



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAVU MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

NÁVRH A REALIZACE 3D TISKÁRNY S VYSOKÝM ROZLIŠENÍM TISKU

DESIGN AND REALISATION OF 3D PRINTER WITH HIGH RESOLUTION OF PRINT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Luboš Pemeľ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Daniel Dušek, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Luboš Pěml

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906T001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh a realizace 3D tiskárny s vysokým rozlišením tisku

v anglickém jazyce:

Design and realisation of 3D printer with high resolution of print

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současnosti jsou technologie 3D tisku na výrazném vzestupu. Jednou možností 3D tisku je stereolitografie, kdy je možno k vytvrzení fotopolymery použít DLP projektor.

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je navržení a realizace 3D tiskárny pracující na principu stereolitografického vytvrzování fotopolymerů.

Seznam odborné literatury:

http://3dtisk.blogspot.cz/2012_05_01_archive.html

<http://www.kickstarter.com/projects/b9creations/b9creator-a-high-resolution-3d-printer>

https://nano-cemms.illinois.edu/materials/3d_printing_full

<http://3dhomemade.blogspot.cz/>

<http://www.c-n-c.cz/viewtopic.php?f=81&t=8114&sid=8a7e3ee09f563348af443fc50ce4fc41>

Vedoucí diplomové práce: Ing. Daniel Dušek, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 20.11.2013

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt:

Práce se zabývá návrhem a realizací stereolitografické 3D tiskárny využívající DLP projektor. Popisuje tedy volbu vhodných komponent a stavbu mechanické konstrukce tiskárny, řešení elektronické části tiskárny a tvorbu host softwaru i firmwaru. Na základě provedených experimentů jsou uvedena doporučená nastavení parametrů tiskárny.

Klíčová slova:

3D tiskárna, stereolitografie, fotopolymer

Abstract:

This thesis deals with the design and realisation of the stereolithographic 3D printer using DLP projector. The work describes the selection of suitable components for the printer's mechanical construction and manufacturing of this construction, the solution of printer's electronics and creation of the printer's host software and firmware. Recommendations based on executed experiments for the parameters' values settings have been given here.

Keywords:

3D printer, stereolithography, photopolymer

Bibliografická citace:

PEML, L. Návrh a realizace 3D tiskárny s vysokým rozlišením tisku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 62 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Daniel Dušek, Ph.D..

Prohášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně na základě svých vědomostí, rad a pokynů vedoucího diplomové práce, poskytnutých materiálů a odborných konzultací.

V Brně, dne 27. 5. 2014

Bc. Luboš Pémľ

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Danielovi Duškovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky poskytované během tvorby diplomové práce.

Obsah

1Úvod.....	10
1.1Využití 3D tisku.....	11
1.2Historie.....	12
1.3Princip.....	14
2Konstrukce.....	16
2.1Kostra.....	16
2.2Osa z.....	17
2.2.1Posuvný šroub.....	17
2.2.2Uložení šroubu.....	18
2.2.3Vedení lineárního posuvu.....	19
2.2.4Plošina.....	21
2.3Nádoba.....	23
2.4Uchycení projektoru.....	24
2.5Kryt.....	25
3Fotopolymer.....	26
4Elektronika.....	27
4.1DLP projektor.....	27
4.2Motor.....	29
4.3Driver.....	30
4.4Mikrokontroler.....	32
4.5Napájení.....	33
5Software.....	35
5.1Struktura řízení.....	35
5.2Firmware.....	36
5.3Host software.....	38
5.4Slicer.....	43
6Tisk.....	45
6.1Ozařování zespod.....	45
6.2Vliv času expozice na tloušťku vrstvy.....	46
6.3Určení parametrů tisku.....	48
7Závěr.....	57
8Seznam použitých zdrojů.....	58
9Seznam použitých zkratk a symbolů.....	60
10Seznam příloh.....	62

1 Úvod

Tato práce se zabývá kompletním návrhem a realizací stereolitografické 3D tiskárny využívající DLP projektor. Požadavkem je tisk s velikostí voxelu maximálně $0,02\text{ mm} \times 0,02\text{ mm} \times 0,1\text{ mm}$ a možnost vyrábět součásti až 100 mm vysoké.

Úvodní kapitola ve stručnosti představí problematiku 3D tisku a princip stereolitografie. Na základě požadovaných parametrů a vlastností jednotlivých typů stereolitografických tiskáren bude zvolena vhodná koncepce tiskárny.

Druhá část práce se zabývá návrhem konstrukčního řešení tiskárny (zejména polohovací osy z a výběrem vhodných komponent k realizaci návrhu).

Ve třetí kapitole budou kvůli přehlednosti práce uvedeny základní vlastnosti použitého fotopolymeru.

V kapitole Elektronika bude nejprve rozebráno, na základě jakých kritérií proběhl výběr projektoru a jaké úpravy na něm bylo třeba provést. Dále se kapitola věnuje komponentám, kterých bylo využito při realizaci pohonu polohovací osy z a jejího řízení.

Software používaný či vytvořený k ovládání tiskárny popisuje kapitola 5. U vytvořeného softwaru je nastíněn postup návrhu, u staženého sliceru je důraz kladen na popis vhodného nastavení programu.

Poslední kapitola popisuje experimenty provedené za účelem určení takových parametrů tisku, které by vedly k výsledkům odpovídajícím zadání.

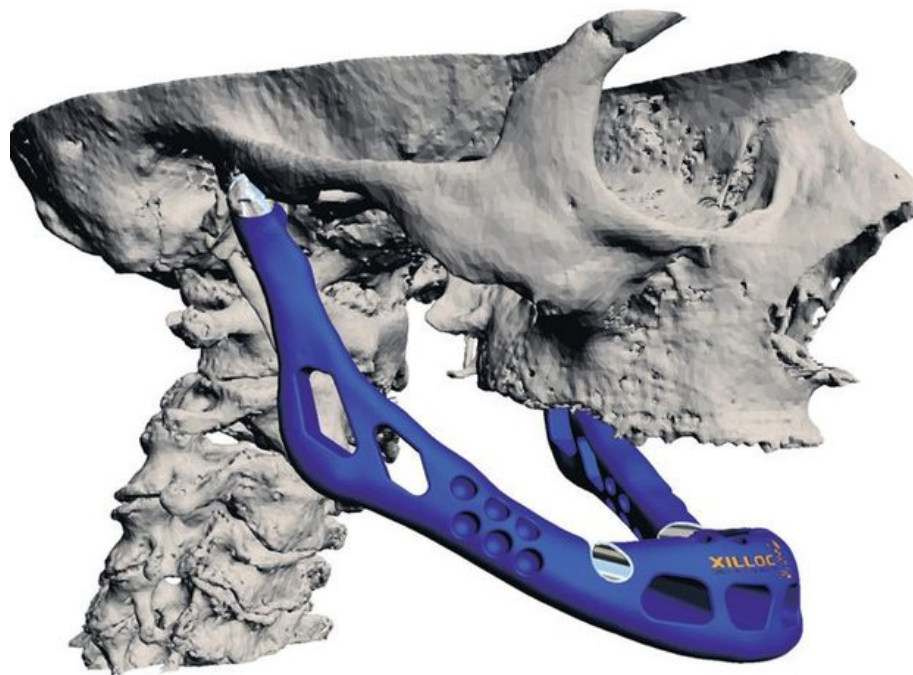
1.1 Využití 3D tisku

Stereolitografie je jednou z technologií Rapid Prototypingu. Jako RP se označují aditivní výrobní technologie umožňující přímou výrobu fyzické součásti z 3D modelu postupným vytvářením tenkých vrstev. Jak název napovídá, byly původně tyto technologie využívány pro rychlou výrobu prototypů. To vede k zefektivnění komunikace se zákazníky, zrychlení přípravy výroby a rychlejšímu uvedení výrobku na trh, popřípadě je možné ve stejném čase dosáhnout většího počtu iterací při vývoji výrobku. Co se výroby prototypů týče, má RP největší využití v oblasti automotive a spotřebního průmyslu [1].

Dnes se označování těchto technologií jako RP opouští a nahrazuje se označením Rapid Manufacturing či Digital Additive Manufacturing (DAM), protože se stále častěji tyto technologie používají nejen na výrobu prototypů, ale i na výrobu finálních součástí [2]. DAM je výhodný hlavně pro malosériovou či kusovou výrobu a pro výrobu tvarově složitých součástí. Další výhodou oproti substraktivním metodám je úspora materiálu, na rozdíl od substraktivních technologií u většiny technologií DAM (výjimkou je Laminated Object Manufacturing) nevzniká kromě podpor potřebných pro stavbu součásti téměř žádný odpad. Pomocí DAM je možné zhotovit součásti s takřka libovolně složitými vnitřními a vnějšími tvary, které by byly jinými technologiemi nevyrobitelné.

Využívá se jich proto v leteckém průmyslu, kde se setkáváme s malosériovou produkcí součástí složitých tvarů a ze špatně obrobitelných materiálů [3]. Podle [4] má DAM své místo také v lékařských aplikacích, zejména v oblasti protetiky (obr. 1.1), zubního lékařství, tvorby ortéz a speciálních nástrojů. V automotive se zatím DAM využívá pouze k výrobě dílů pro závodní automobily [3].

Ve fázi vývoje jsou dnes např. mikroaditivní výrobní technologie - technologie DAM modifikované pro výrobu mikroskopických zařízení typu MEMS (microelectromechanical systems) a MOEMS (micro-opto-electro-mechanical systems), nebo technologie Bio Additive Manufacturing používající k výrobě živých buněk.



Obr. 1.1: Počítačový model titanové protézy spodní čelisti vyrobené 3D tiskem (převzato z: <http://www.xilloc.com/patients/stories/total-mandibular-implant>)

1.2 Historie

Na stereolitografický aparát (původní název: Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography) si podal 8. srpna 1984 patentovou přihlášku Charles W. Hull. V roce 1986, hned poté, co byl patent publikován, založil společnost 3D Systems. Společnost záhy představila první systém pro Rapid Prototyping pojmenovaný SLA-1. Produkt nejprve nabídl beta zákazníkům, kterými byly hlavně velké a bohaté společnosti. V této době byl velký zájem o CAD systémy a SLA-1 představoval novinku související s touto oblastí. Na základě zpětné vazby od beta zákazníků vznikl SLA-250 (obr. 1.2), který byl uveden na trh v roce 1988. 3D Systems také přišel s formátem *stl*, který se stal standardem v Rapid Prototypingu i v oblasti CAD systémů. Patent zabránil dalším firmám ve využívání principu stereolitografie, přesto se o to pokusila např. firma Du Pont se systémem SOMOS, který později musela stáhnout z prodeje. Podrobněji se uvedením SLA na trh zabývá např. [5].



Obr. 1.2: SLA – 250

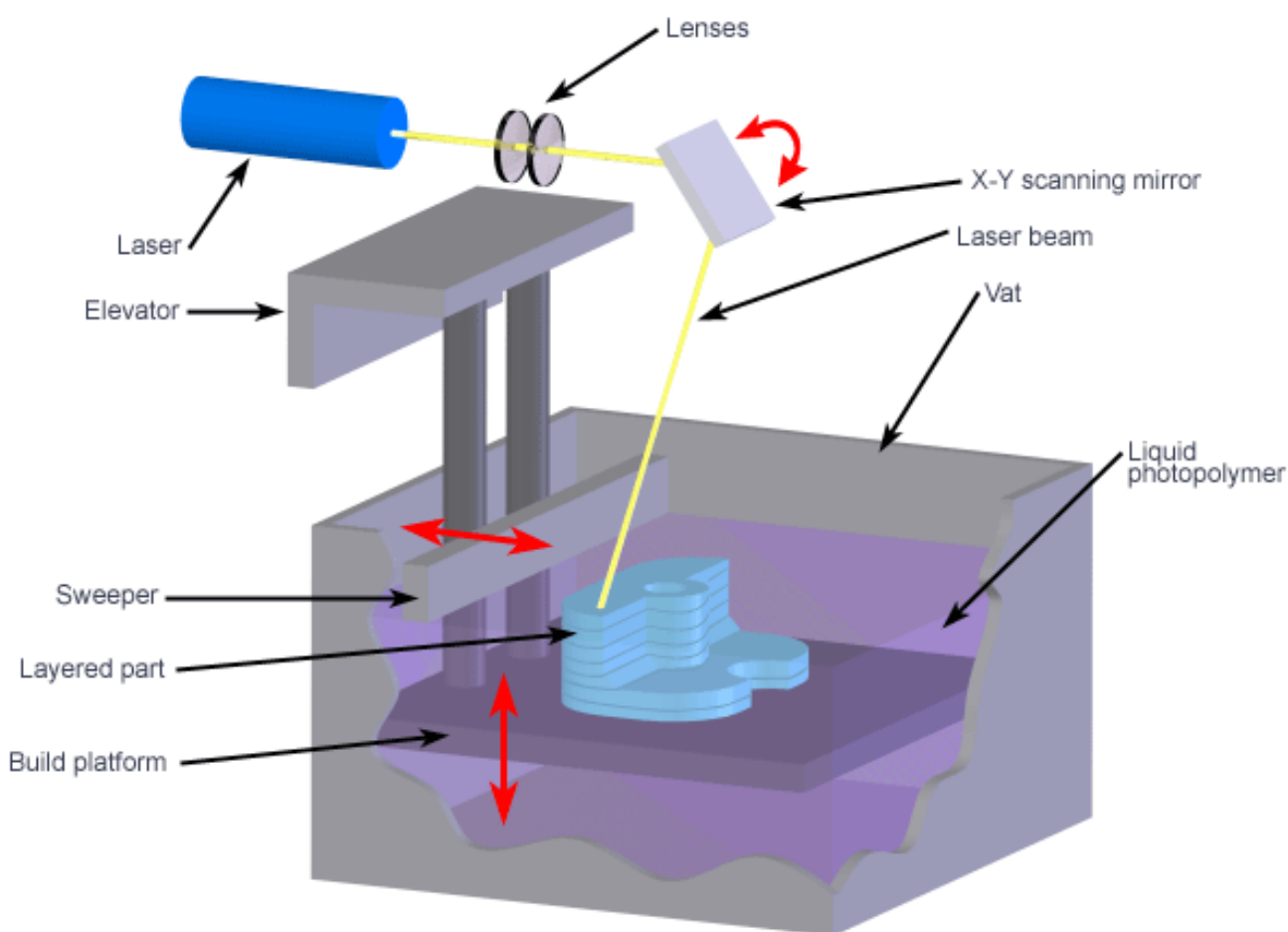
(převzato z: <https://www.princeton.edu/~cml/html/facilities.html>)

Zanedlouho se začaly objevovat jiné technologie Rapid Prototypingu. S technologií Fused Deposition Modeling, patentovanou v roce 1988 S. Scottem Crumpem, přišla firma Stratasys v roce 1992 [6], zařízení využívající technologii Selective Laser Sintering začala společnost DTL prodávat v roce 1989 [7]. V roce 1995 získala společnost Z Corporation patent na technologii 3D Printing. Přibližně v této době se o zařízeních pro Rapid Prototyping začíná mluvit jako o 3D tiskárnách.

Dalším milníkem byl vznik projektu RepRap Dr. Adriana Bowyera v roce 2005, jehož cílem je vytvořit 3D tiskárnu schopnou sebereplikace. Využívá technologii FDM, ale pod názvem Fused Filament Fabrication. RepRap využívá licence GNU GPL, přivedla tak do světa Rapid Prototypingu mnoho nadšenců z celého světa a tím umožnila rychlejší vývoj v této oblasti.

1.3 Princip

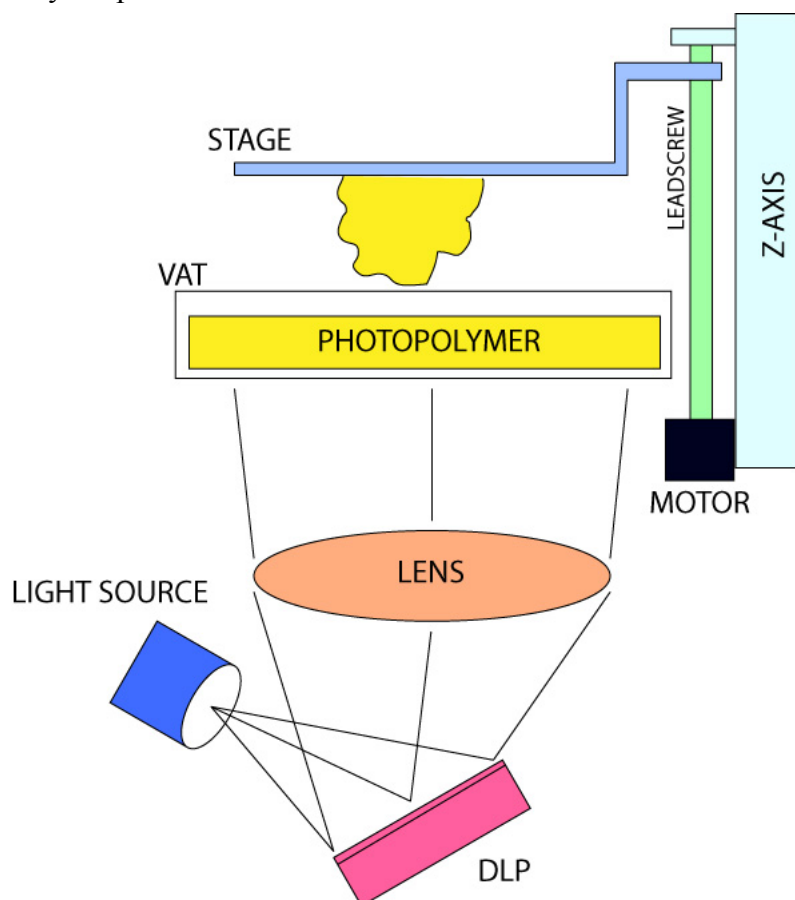
Stereolitografie využívá fotopolymeru, který se vytvrzuje zpravidla UV zářením. Zdrojem UV záření bývá v průmyslových zařízeních laser, např. He-Cd laser. Laserový paprsek je směřován polohovatelným zrcadlem (scanner system) řízeným tak, aby paprsek vykreslil průřez vyráběné součásti. Místo směřovaného laserového paprsku se také používá DLP projektor, který ozáří celou vytvrzovanou plochu najednou. Fotopolymer se v místech dopadu záření vytvrdí, vytvoříme tedy jednu vrstvu výrobku. Tloušťku vrstvy ovlivňují zejména vlastnosti použitého fotopolymeru, intenzita ozáření a doba ozáření. Často se používá recoating systém (sweeper), tvořený speciálním stěračem, který zaručí srovnání hladiny (kvůli povrchovému napětí fotopolymeru). Po vytvrzení vrstvy se plošina s polotovarem posune směrem dolů o tloušťku jedné vrstvy a vytváří se další vrstva. Toto konstrukční řešení ukazuje obrázek 1.3:



Obr. 1.3: Ozařování shora
(převzato z: <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>)

Kromě tohoto konstrukčního uspořádání, při kterém je ozařována nekrytá

hladina fotopolymery shora, je časté také uspořádání podle obr. 1.4 a to hlavně u DIY stereolitografických aparátů.



Obr. 1.4: Ozařování zespod
(převzato z: <https://code.google.com/p/lemoncurry/wiki/main>)

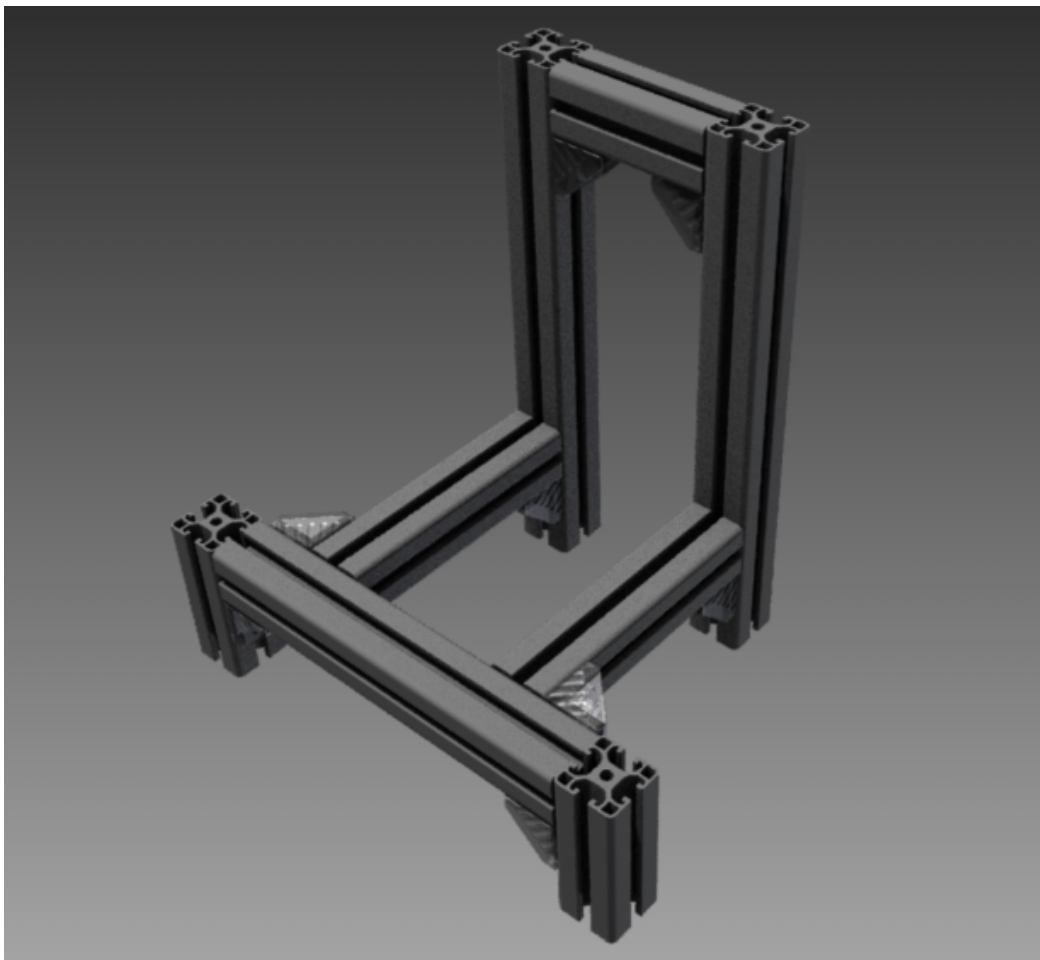
Fotopolymer je nyní ozařován zespod přes průhledné dno nádoby. Vytvrzovaná vrstva je na dně nádoby, po vytvrzení se plošina posune nahoru. Je zřejmé, že nevýhodou tohoto řešení je přilnutí vytvrzeného materiálu ke dnu nádoby. Je proto potřeba na dno nádoby připevnit nepřilnavou fólii, oddělovat polotovar od dna naklápěním nádoby apod. Výhodou oproti předchozímu uspořádání je podle [8] lepší kontrola tloušťky vytvrzované vrstvy, obzvláště je – li použit fotopolymer s vysokou viskozitou, jehož hladina potřebuje k ustálení dlouhou dobu.

Pro svou jednoduchost byla vybrána první popsána koncepce, tedy ozařování nezakryté hladiny fotopolymery shora. Problému s povrchovým napětím tekutého fotopolymery, který způsobuje, že se hladina neuzavře nad již vytvrzenou vrstvou se pokusíme předejít použitím fotopolymery s nízkou viskozitou, malou ozařovanou plochou v rovině $x-y$ a způsobem pohybu plošiny - ta žádanou polohu nejprve podjede, aby kapalina překryla již vytvořenou vrstvu a následně se do žádané polohy vrátí.

2 Konstrukce

2.1 Kostra

Ke konstrukci kostry byly použity díly stavebnicového systému Item. Předností tohoto řešení oproti použití jiných profilů je jednoduchost a rychlost montáže kostry bez nutnosti svařování či vrtání děr pro šrouby. Základním prvkem systému jsou eloxované hliníkové profily s drážkami umožňujícími snadné a přesné připevnění dalších komponent tiskárny ke kostře. Obrázek 2.1 ukazuje návrh kostry:



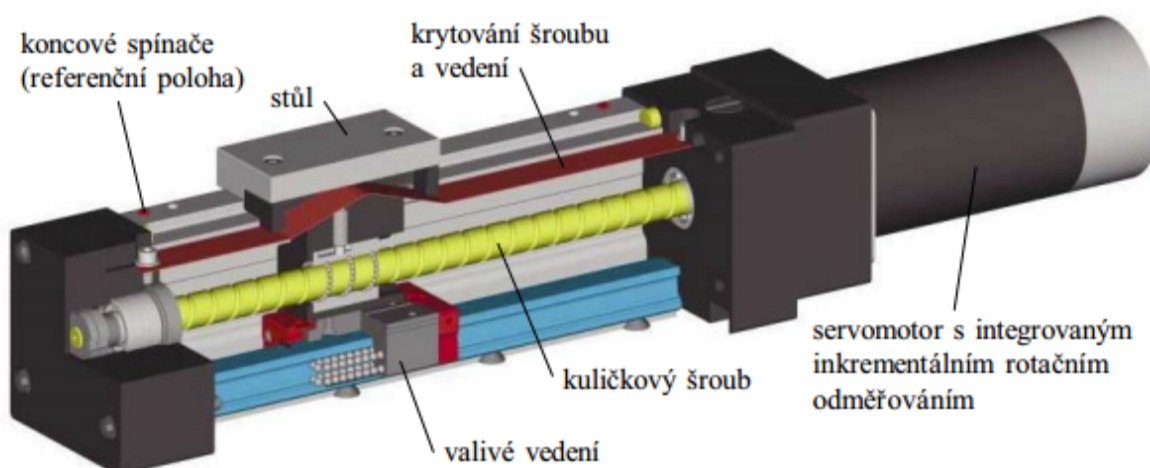
Obr. 2.1: Kostra

2.2 Osa z

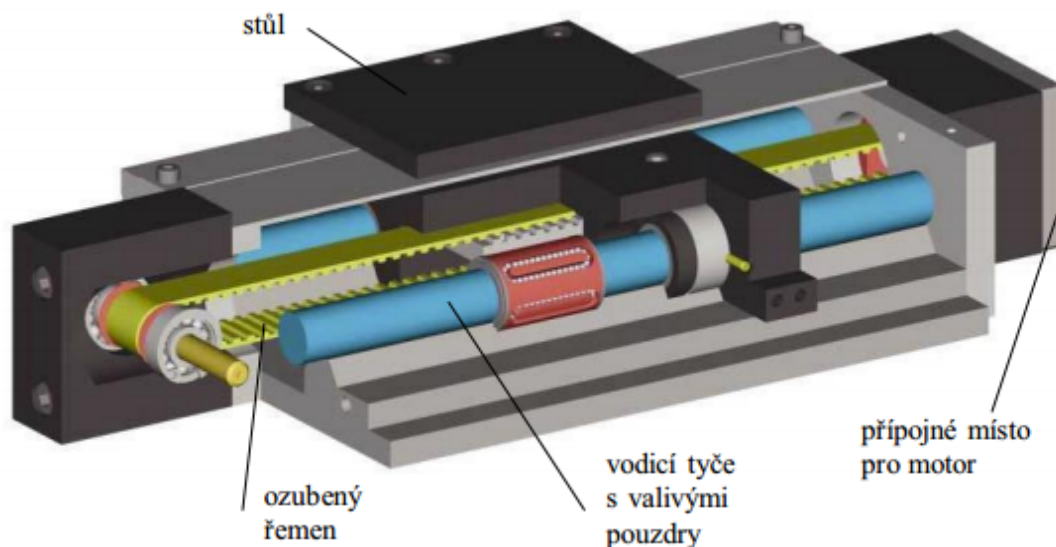
2.2.1 Posuvný šroub

Pro převod rotačního pohybu motoru na pohyb přímočarý se u obráběcích strojů nejčastěji používá posuvných šroubů či ozubených řemenů ve spojení s vedením lineárního posuvu (obr. 2.2 a 2.3).

Ozubené řemeny však nesplňují naše nároky na přesnost polohování. Řemen totiž bývá pružný, převod má velkou hodnotu posuvu na jednu otáčku motoru (při menším posuvu na otáčku se stejná chyba v poloze výstupní hřídele motoru projeví na přímočarém posuvu menší měrou) a pokud se mezi výstupní hřídel motoru a řemenici zařadí převodovka, má na výslednou přesnost negativní vliv její vůle. Byl tedy zvolen převod posuvným šroubem.



Obr. 2.2: Řez konstrukcí lineární osy s kuličkovým šroubem
(převzato z: [9])



Obr. 2.3: Řez konstrukcí lineární osy s ozubeným řemenem
(převzato z: [9])

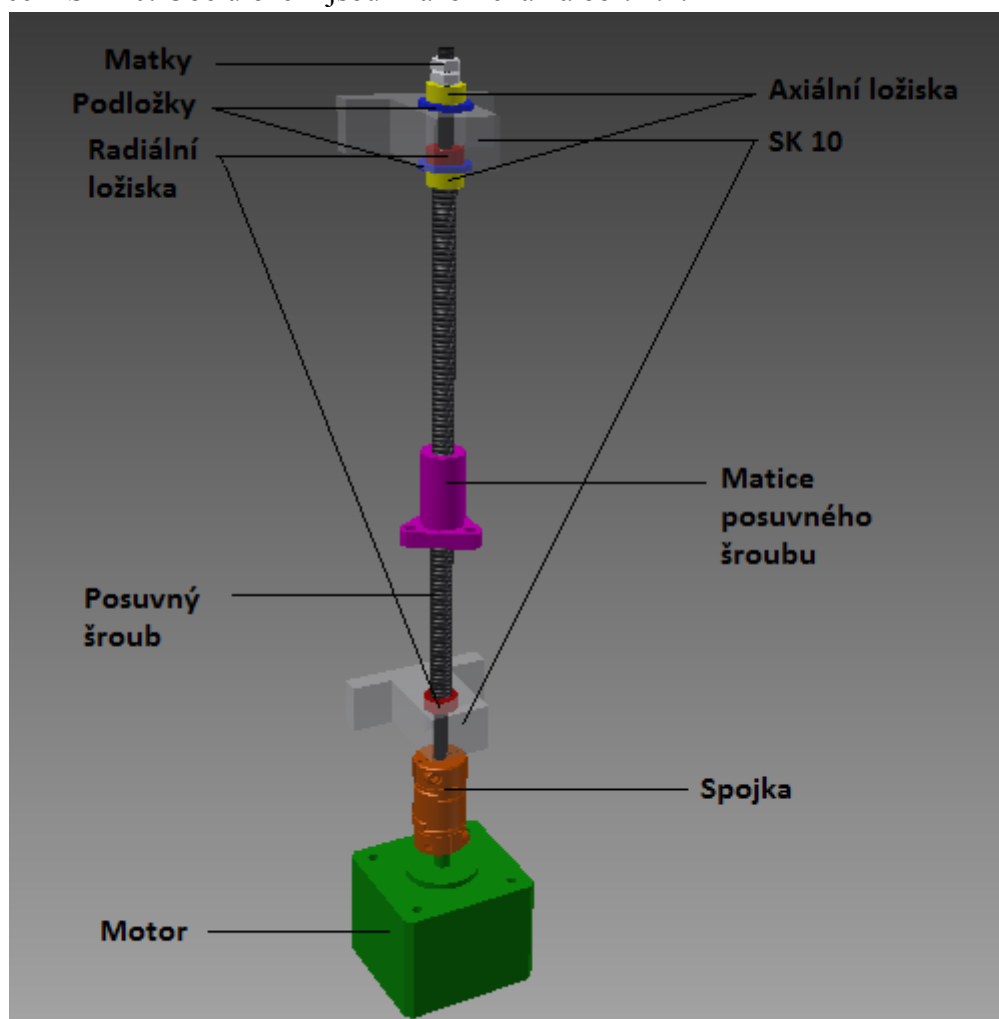
V ose z chceme nastavovat polohu maximálně po $0,01\text{ mm}$, aby bylo rozlišení dostatečné i při případném doplnění tiskárny o recoating systém, který by zvýšil její přesnost. Vzhledem k vysoké ceně kuličkových šroubů a nedostatečné přesnosti šroubů trapézových byl vybrán bezkuličkový šroub Kerk průměru $6,35\text{ mm}$ se stoupáním 1 mm . Matice šroubu je provedena jako bezvúlová a šroub je pro zmenšení tření opatřen TFE povrchovou vrstvou. Výhodou je také menší stoupání – u válcovaných kuličkových šroubů bývá 5 mm , naproti tomu stoupání šroubu Kerk je 1 mm (menší chyba v polohování způsobená výrobními tolerancemi motoru). Nevýhodou šroubu Kerk je výrazně nižší povolené zatížení šroubu – maximální $2,3\text{ kg}$ a doporučené pouhých $0,575\text{ kg}$ (dále budeme pro doporučené zatížení šroubu používat označení $M_{\text{Doporučená}}$).

2.2.2 Uložení šroubu:

Uložení a opracování pohybového šroubu bylo navrženo tak, aby umožňovalo posuv matice v rozsahu 124 mm . Rezerva 24 mm oproti zadanému rozsahu pohybu byla zvolena po konzultaci s firmou provádějící soustružnické práce, aby zohledňovala citlivost teflonového povrchu šroubu, resp. možnost jeho poškození vysokou teplotou či manipulací při obrábění.

Pro dosažení vysoké přesnosti je nutné zajistit dostatečnou tuhost celého posuvného mechanismu. Šroub je proto uložen po vzoru běžných lineárních modulů KK s kuličkovým šroubem na obou koncích: na horním pevně a na spodním volně. Pevné

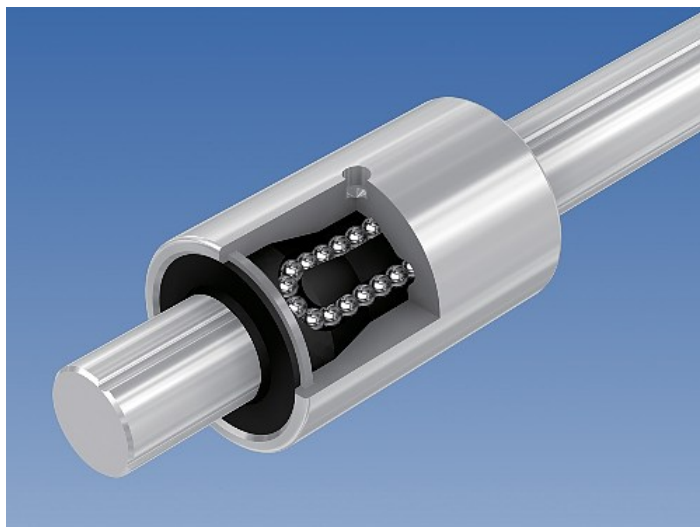
uložení, které zachycuje radiální i axiální síly, je tvořeno dvěma axiálními ložisky přitlačovanými k podložkám opřeným o uchycení pro vodicí tyč SK 10 matkami a dále radiálním ložiskem uvnitř SK 10. Volné uložení se skládá pouze z radiálního ložiska v uchycení SK 10. Obě uložení jsou znázorněna na obr. 2.4:



Obr. 2.4: Uložení šroubu

2.2.3 Vedení lineárního posuvu:

Cenově nejpriznivější možností je vodicí tyč a kuličkové pouzdro (obr. 2.5). Kuličkové pouzdro má v sobě uzavřené kuličkové dráhy, ve kterých obíhají kuličky odvalující se po vodicí tyči při pohybu pouzdra. Pouzdro tak při pohybu nepřekonává smykové tření, ale valivý odpor a síly působící proti pohybu jsou proto menší. Pouzdra se dodávají také instalována v domku (linearsety).



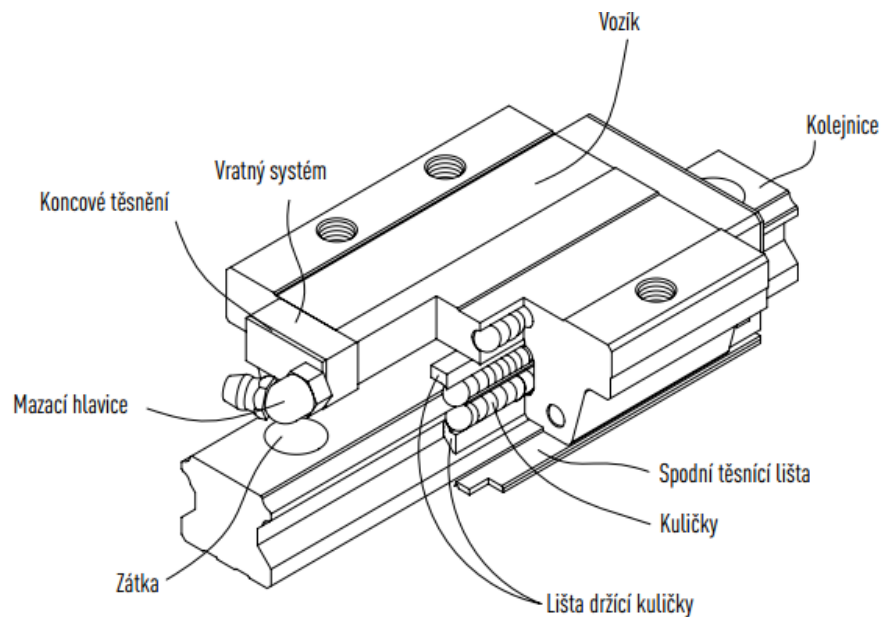
Obr. 2.5: Řez kuličkovým pouzdrem na vodící tyči
(převzato z: http://www.designworldonline.com/lg-linear-guide-ball-bushing-from-thk/#_)

Velmi podobným řešením je podepřená vodící tyč a otevřené kuličkové pouzdro (obr. 2.6). Výhodou oproti předchozí variantě je, že podepření brání tyči v prohýbání. Její použití je vhodné spíše pro dlouhé či více namáhané posuvy.



Obr. 2.6: Podepřená vodící tyč s otevřeným linearsetem
(převzato z: <http://www.glacern.com/sbr>)

Uložení pouzdra a vodící tyče bývá obvykle v toleranci H7/h6, což je uložení s vůlí. Tato vůle by zapříčinila nežádoucí kývání osy z vedoucí k vzájemnému posunutí jednotlivých vytvrzených vrstev v rovině x - y . Bylo proto zvoleno kolejnicové lineární vedení HIWIN (obr. 2.7), u kterého je vozík na kolejnici uložen se středním předpětím, tedy s přesahem. Vozík v sobě má čtyři uzavřené kuličkové dráhy.



Obr. 2.7: Lineární vedení
(převzato z: [10])

Použití lineárního vedení vede ke značnému zjednodušení montáže osy, kolejnice stačí přišroubovat do drážek profilů Item.

2.2.4 Plošina

Pro větší tuhost posuvu bylo užito dvou lineárních vedení, na nichž je přišroubován dvoudílný nosník. Ve středu nosníku je otvor, kterým prochází posuvný šroub. Šroub je namontován na plechu s výřezy pro příruby vozíků. Na nosníku je šrouby připevněna matice posuvného šroubu a plošina, na níž stojí tisknutá součást. Plošina je sestavena z ohýbaného plexiskla a desky plošných spojů (cuprextitu). Deska plošných spojů je nalepena měděnou stranou vzhůru tak, aby bylo možné výrobek lehce oddělit od kovového podkladu nožem. Obr. 2.8 zachycuje plošinu na hotové tiskárně:



Obr. 2.8: Plošina

Celá plošina byla zkonstruována tak, aby její hmotnost byla pod doporučenou hodnotou axiálního zatížení posuvného šroubu s rezervou dostačující pro zvedání výrobků. Maximální možná hmotnost výrobku M_{Vmax} je dána maximálními možnými rozměry a hustotou fotopolymeru ρ (viz kap. 3) rcí (1):

$$M_{Vmax} = x_{max} \cdot y_{max} \cdot z_{max} \cdot \rho = (0,02048 \cdot 0,01536 \cdot 0,1) m^3 \cdot 1100 kg/m^3 = 0,035 kg \quad (1)$$

Hmotnost plošiny po sestavení (včetně vozíků a matky) M_p dosahovala 0,481 kg. Rozdíl ΔM mezi doporučeným axiálním zatížením šroubu $M_{Doporučená}$ a hmotností plošiny M_p musí být menší než maximální možná hmotnost výrobku (2):

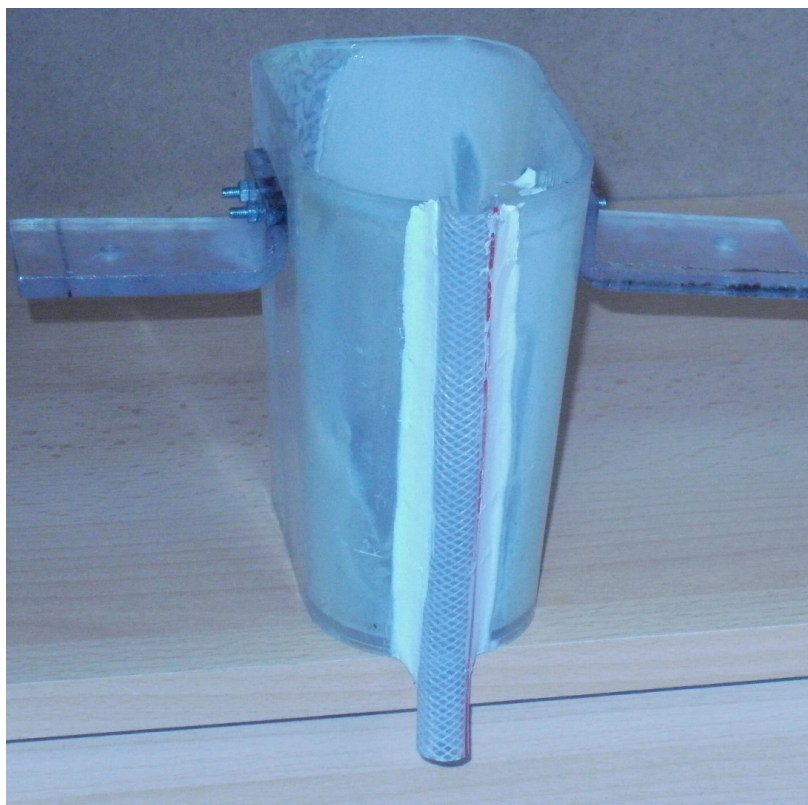
$$\Delta M = (M_{Doporučená} - M_p) = (0,575 - 0,481) kg = 0,094 kg < M_{Vmax} \quad (2)$$

Podle (2) je tedy hmotnost plošiny M_p vyhovující.

2.3 Nádoba

Jako nádoba na fotopolymer (obr. 2.9) posloužila kuchyňská dóza na sypké hmoty. Její výška byla upravena řezáním na 115 mm. Nádoba je ke kostře připevněna pomocí dvou plastových destiček ohnutých do tvaru L. Výška hladiny v nádobě je nastavena přetokovou drážkou. Aby byla hladina ve správné výšce (tj. v takové vzdálenosti od objektivu, aby byl obraz promítaný na hladinu ostrý), bylo potřeba nejdříve naplnit nádobu vodou. Na hladinu se pak položilo stínítko (část kotouče z diskety) a vyvrtaný otvor byl jemně dopilován do požadované hloubky, přičemž byla pomocí lupy neustále kontrolována ostrost obrazu na stínítku. K přední stěně nádoby je silikonovým tmelem připevněna podélně seřezaná hadice, kterou fotopolymer odtéká přes přetokovou drážku. Pod přetokovou hadicí je nádoba na zachycení přetékajícího fotopolymeru.

Nádoba byla původně nastříkána autolakem na černo, aby zvenčí skrz stěny nádoby nepronikalo světlo a aby se minimum světla dopadajícího do nádoby shora odráželo od stěn. Později se ale ukázalo, že fotopolymer stékající po stěně nádoby nástřík rozpouští. Při výrobě nové nádoby bylo od nástříku ustoupeno.



Obr. 2.9: Nádoba na fotopolymer

2.4 Uchycení projektoru

Projektor je šrouby uchycen na plechu. Na horní části kostry je přišroubována plechová destička, na které je pant držící plech s projektorem. Projektor je při tisku ve svislé poloze, přičemž dosedá na doraz vymezující boční vůli pantu a na doraz zaručující kolmost osy objektivu k hladině. U druhého zmíněného dorazu je silný magnet, jenž plech s projektorem udržuje přiražený k dorazu vymezujícímu boční vůli pantu. Jako dorazy byly použity šrouby, dorazy jsou tedy nastavitelné. Po dokončení tisku lze projektor odklopit do horizontální polohy (obr. 2.10). Tím se uvolní prostor potřebný pro vyjmutí vyrobené součástky, doplnění fotopolymery v nádrži apod. V horizontální poloze se plech s projektorem opírá o podporu tvořenou plastovou deskou na pantu. Tato vyklápěcí podpora je při spouštění projektoru do svislé polohy otočena stranou směrem ke středu kostry.



Obr. 2.10: Uchycení projektoru

2.5 Kryt

Kryt byl sestaven, aby omezil vnikání prachu i světla z okolí do vnitřního prostoru tiskárny, v neposlední řadě však má také funkci estetickou.

Jeho díly byly vyřezány laserem z překližky silné 4 mm. Je tvořen čtyřmi stěnami, horní deskou a otevíracími dvířky s průzorem. Na styčných hranách stěn a horní desky byly vyřezány zámky pro usnadnění lepení a zpevnění spojů. Dvířka drží na pantu připevněném k horní desce. K pravé boční stěně (stěna vzdálenější od projektoru) je připevněn driver, mikrokontroler a zdroj napájení. V zadní desce byl na horní straně vytvořen otvor pro vyvedení kabeláže. Ke kostře je kryt uchycen šesti šrouby. Na obr. 2.11 je kryt vyfocen před namontováním na kostru:



Obr. 2.11: Kryt projektoru – počítačový model

3 Fotopolymer

Z důvodů nastíněných v úvodu byl zvolen fotopolymer s nízkou viskozitou (menší než $50 \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$) Spot – LV (obr. 3.1) od firmy Spot – A Materials. Fotopolymer je výrobcem zařazen do kategorie vysoce reaktivních pryskyřic. Je transparentní. Doporučená svítivost DLP projektoru použitého k vytvrzování je 2000 až 3500 *ANSI lm*. Fotoiniciátory pryskyřice jsou citlivé na záření s vlnovou délkou od 280 nm do 425 nm, tzn. na záření UVB, UVA a i na modré světlo ve viditelném spektru. Hustota fotopolymeru ρ je mezi 1000 a 1100 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.



Obr. 3.1: Spot – LV
(převzato z: [11])

4 Elektronika

4.1 DLP projektor

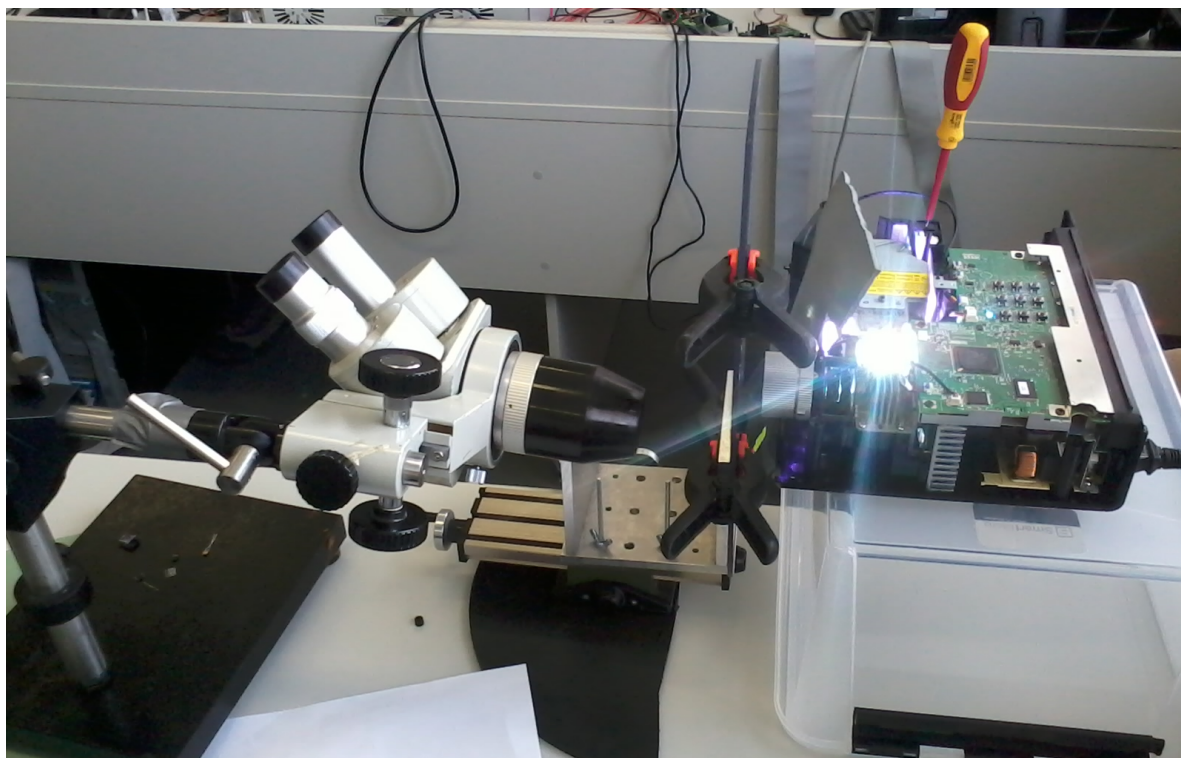
Použitelný je jakýkoliv DLP projektor s vhodnou lampou (lampa s velkou intenzitou záření v oblasti modrého světla a UV záření, např. P-VIP nebo UHP lampy) a s dostatečnou svítivostí. U projektoru bude potřeba upravit vzdálenost objektivu od projektoru tak, aby bylo možné zaostřit obraz v požadované velikosti. V našem případě to bude při rozlišení projektoru 1024 x 768 pixelů a při požadované velikosti voxelu 0,02 mm x 0,02 mm v rovině $x-y$ obraz velikosti 20,48 mm x 15,36 mm. Dalším krokem bude test, který prověří, zda bude nutné odstranění barevného filtru projektoru (fotopolymer se pak vytvrdí UV zářením) nebo pro vytvrzení postačí modré světlo, které projde skrz barevný filtr.

Abychom při těchto úpravách předešli komplikacím způsobeným kupříkladu krytem, který by znemožnil přístup k barevnému filtru, bylo voleno z projektorů použitých v jiných již funkčních tiskárnách. Dalšími rozhodujícími kritérii byly cena a dostupnost. Z těchto hledisek se nejlepším řešením zdál být projektor Acer X1240 (obr. 4.1), jenž byl použit v tiskárně Sedgwick (domovská stránka projektu: [12]). Projektor má P – VIP lampu a svítivost 2700 ANSI lm.



Obr. 4.1: Projektor Acer X1240
(převzato z: <http://www.projectorshop24.co.uk/acer-projector/acer-x1240/>)

První provedenou úpravou bylo posunutí objektivu projektoru (obr 4.2). Naproti objektivu byla zafixována k posuvnému stolku ze stojanové vrtačky tabule plexiskla. K tabuli bylo na plochu blíže k projektoru svorkami přitlačováno stínítko. Z druhé strany plexiskla byl postaven mikroskop pro kontrolu ostrosti obrazu. Velikost obrazu byla měřena posuvným měřítkem přiloženým ke stínítku. Objektiv je ke zbytku projektoru připevněn třemi šrouby, k jeho posunutí se využilo distančních kroužků a distančních sloupků. Obraz požadované velikosti byl zaostřen při posunutí objektivu o $19,5\text{ mm}$.



Obr. 4.2: Posuv objektivu

Při stavbě stereolitografických 3D tiskáren s DLP projektorem je často kvůli fotopolymernu nutné odstranění barevného filtru, který absorbuje UV záření. Jeho odstraněním se však podle [13] zkracuje životnost DMD čipu. V našem případě má pryskyřice fotoiniciátory citlivé na modré světlo o vlnové délce do 425 nm . Byl proveden test, při kterém se projektor uchytí objektivem vzhůru a nad něj byla připevněna Petriho miska naplněná fotopolymernem. Projektor svítil skrz dno misky. Při testu byla použita základní modrá barva modelu RGB, tedy barva označovaná v šestnáctkové soustavě jako `#0000FF`. Z principu činnosti DLP projektorů totiž vyplývá, že jiné odstíny modré by byly jen kombinací této základní barvy s jinými základními barvami z RGB vzniklé rychlým střídáním těchto barev, které ale mají zcela jistě vlnovou délku větší než 425 nm a proto by byl výsledek nutně horší. Test potvrdil, že k vytvrzování lze použít i projektor s barevným filtrem.

4.2 Motor

Pro jednoduchost řízení byl k pohonu osy z vybrán krokový motor. Před zvolením konkrétního motoru byl určen potřebný moment.

K tomu je nutné nejdříve určit třecí sílu F_T v lineárních vedeních. Při výpočtech vycházíme z [10]. F_T vzniká při působení přitlačné síly, která má při středním předpětí lineárního vedení hodnotu $0,03 - 0,07 \cdot C_{dyn}$. Při hodnotách přitlačné síly menších než $0,1 \cdot C_{dyn}$ však třecí odpor závisí hlavně na odporu maziva a na tření mezi valivými tělesy a nelze jej jednoduše určit. Při výpočtu proto uvažujeme přitlačnou sílu $F_{rad} = 0,1 \cdot C_{dyn}$, která je vyšší než skutečná přitlačná síla a tření určíme ze vztahu (3):

$$F_T = F_{rad} \cdot \mu = 0,1 \cdot C_{dyn} \cdot \mu = (0,1 \cdot 11380 \cdot 0,004) N = 4,552 N \quad (3)$$

Axiální síla F_{Ax} působící na šroub během rovnoměrného pohybu je dána vztahem (4):

$$F_{Ax} = (M_{Vmax} + M_p) \cdot g + 8 \cdot F_T = ((0,035 + 0,481) \cdot 9,81 + 8 \cdot 4,552) N = 41,48 N \quad (4)$$

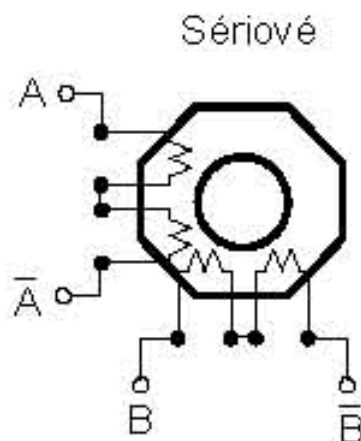
Jeden vozík má čtyři kuličkové dráhy tlačící na kolejnici a používáme dva vozíky, F_T je proto v (4) násobena osmi.

Potřebný moment pro pohánění posuvného šroubu M (podle katalogu Kerk dostupném na [14]) stanovíme z vztahu (5):

$$M = \frac{F_{Ax} \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta} = \left(\frac{41,48 \cdot 0,001}{2 \cdot \pi \cdot 0,4} \right) N \cdot m = 0,017 N \cdot m \quad (5)$$

Kde P je stoupání závitu posuvného šroubu a η je účinnost.

Pro pohon osy z byl zvolen krokový motor SX 17–1003 dodávaný firmou Microcon. Moment motoru je $0,3 Nm$, pohon je tedy dostatečně předimenzovaný (podle [14] je běžné krokové motory volit tak, aby momentová rezerva byla 50 – 100%). Jmenovitý proud motoru I_n je $1 A$, motor je dvoufázový, se sériovým bipolárním zapojením vinutí (obr. 4.3).



Obr. 4.3: Zapojení vinutí motoru SX 17-1003
(převzato z: [14])

Je opatřen standardní přírubou NEMA 17. Má 200 kroků na otáčku, posuv na krok určíme z rce (6):

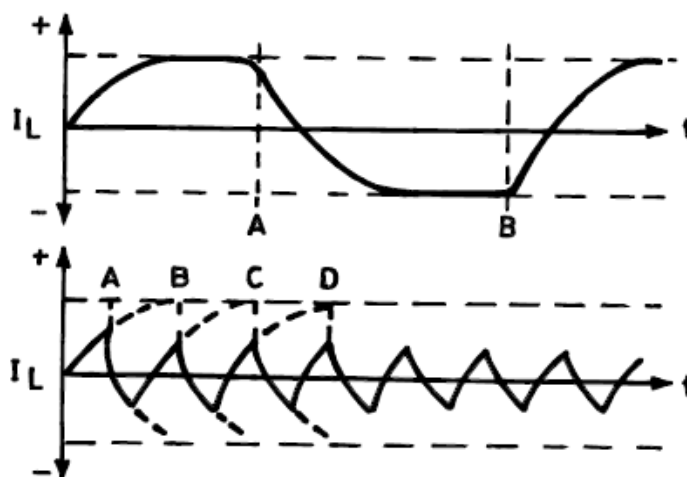
$$\text{posuv} / \text{krok} = \frac{P}{\text{kroků na otáčku}} = \frac{1 \text{ mm}}{200 \text{ kroků}} = 0,005 \text{ mm / krok} \quad (6)$$

4.3 Driver

Driver je výkonová elektronika, která převádí jednoduché povely mikrokontroleru (signály *PUL* a *DIR*) na sekvence buzení jednotlivých fázových vinutí motoru potřebné pro uskutečnění požadovaného pohybu. Základním požadavkem tedy je, aby měl výkon postačující pro buzení daného motoru.

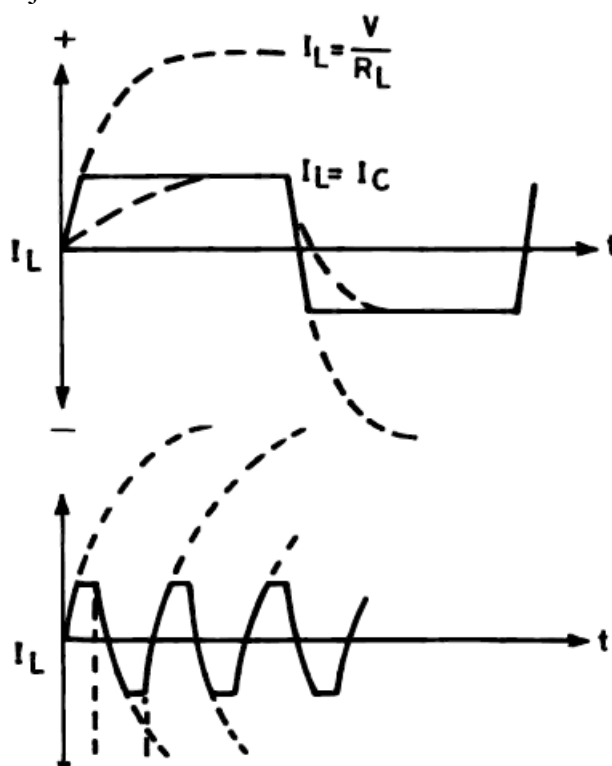
Země USB portu počítače, z něž se napájí mikrokontroler může být na jiném potenciálu než země napájení driveru, v důsledku toho mohou při spojení obou zemí vznikat zemní smyčky. Arduino má zabudovanou ochranu USB, která při proudu větším než 500 mA přeruší spojení. Přerušení či chyba v komunikaci s PC by však mohla znamenat zničení tištěné součástky. Z tohoto důvodu raději volíme driver s galvanicky odděleným vstupem (viz obr. 4.8). Oddělením výkonových a řídicích obvodů zabráníme vzniku zemních smyček, které by mohly přerušovat komunikaci s PC a navíc tak i posílíme ochranu PC.

Podle parametrů motoru a ceny byl tedy vybrán driver M415B od Leadshine Technology Co., Ltd (obráz. 4.6). Vybraný driver reguluje proud protékající vinutím motoru. Podle [15] se totiž při napájení bipolárního krokového motoru v jednotlivých vinutích neustále mění směr proudu a při vysokých frekvencích krokování se proud protékající vinutím I_L nestihne dostat na žádanou hodnotu I_C (obráz. 4.4, spodní graf):



Obr. 4.4: I_L-t - driver bez regulace proudu
(převzato z: [15])

Odpor vinutí společně s jeho indukčností tvoří LR obvod, ve kterém má proud I_L při skokové změně napětí exponenciální průběh. Naproti tomu pokud driver reguluje proud vinutím, regulátor při změně polarity dodává do obvodu vyšší napětí, než v předchozím případě, kde byla velikost napětí určena pouze odporem vinutí. Tím dosáhneme rychlejšího ustálení I_L na I_C , což nám umožní zachovat moment motoru i při vyšších otáčkách, jak je ukázáno na obr. 4.5:



Obr. 4.5: I_L-t - driver s regulátorem proudu
(převzato z: [15])

Driver pracuje s napájecím napětím 15 – 40 V. Špičkový výstupní proud I_P je nastavitelný od 0,21 A do 1,5 A, určuje se z jmenovitého proudu motoru podle (7):

$$I_P = I_n \cdot 1,4 = (1 \cdot 1,4) A = 1,4 A \quad (7)$$

Nejbližší nižší nastavitelnou hodnotou I_P je 1,26 A. Driver dále umožňuje mikrokrokování, kvůli plynulosti pohybu bylo použito dělení kroku na 4 mikrokroky.

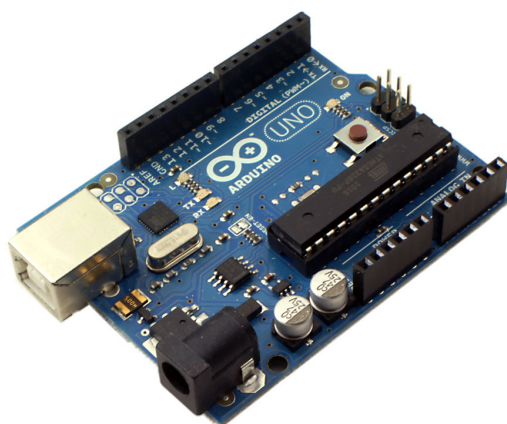


Obr. 4.6: Driver M415B

(převzato z: <http://www.circuitshops.com/articles/42107951/New-Leadshine-M415B-Stepper-Drives-work.html>)

4.4 Mikrokontroler

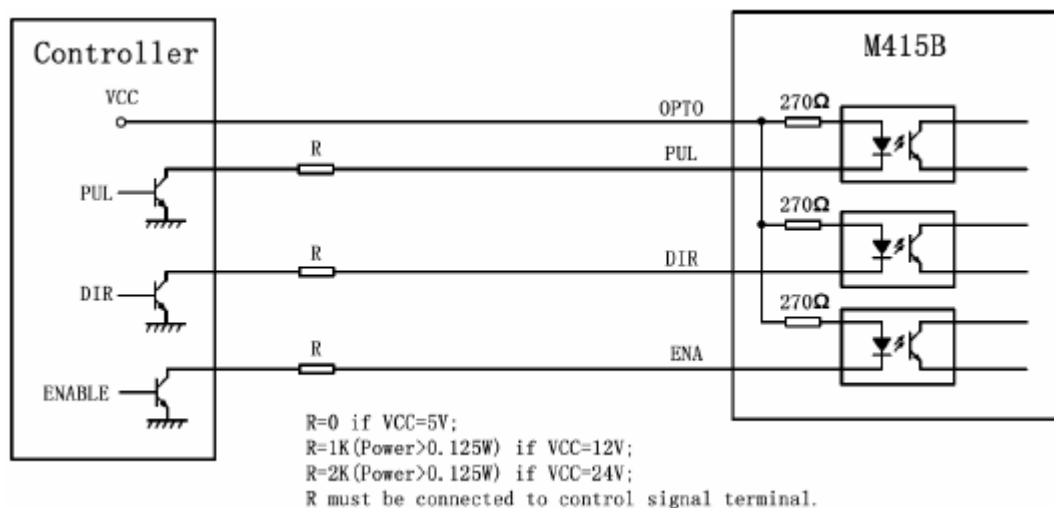
Úkolem mikrokontroleru je posílat řídicí signály výkonové elektronice krokového motoru. Byl použit mikrokontroler Arduino Uno (obr. 4.7), jenž je využíván například v projektech RepRap. Mezi jeho výhody patří zejména jednoduché programování založené na jazyce C a rozsáhlá komunita uživatelů, která na fórech produkuje nepřeberné množství návodů a příkladů.



Obr. 4.7: Arduino Uno

(převzato z: <http://www.liquidware.com/shop/show/ARD-UNO/Arduino+Uno>)

Výstupní piny Arduino budou použity v režimu sink (pokud budou na hodnotě *low*, poteče do nich proud), jak je patrné z následujícího schématu z manuálu k driveru (obr. 4.8):



Obr. 4.8: Schéma zapojení driveru k mikrokontroleru
(převzato z: [16])

Maximální povolený proud na pin je 40 mA , přičemž nejvyšší proud bude pin označený ve schématu jako VCC dodávat, budou-li piny PUL a DIR nastaveny na hodnotu *low* (proud poteče oběma piny). Pin ENA necháváme odpojený. Celkový odpor pak bude dán vztahem (8):

$$R_{celk} = \frac{1}{\frac{1}{270\Omega} + \frac{1}{270\Omega}} = 135\Omega \quad (8)$$

Nejvyšší proud dodávaný pinem VCC určíme z rce (9):

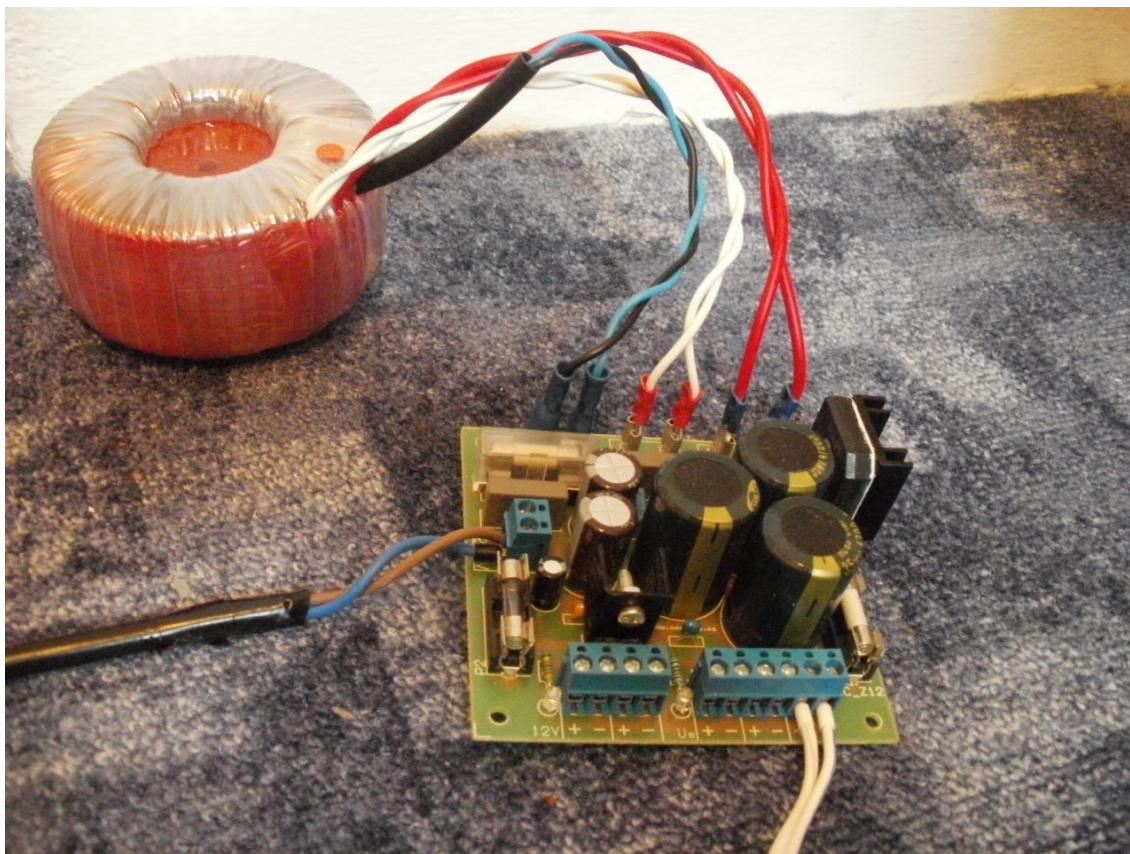
$$I = \frac{U}{R} = \frac{5V}{135\Omega} = 37\text{ mA} \quad (9)$$

Podle rce (9) je nejvyšší proud dodávaný pinem VCC menší než maximální povolený proud na pin, zapojení je tedy v pořádku.

4.5 Napájení

Pro napájení motoru přes driver vyžadujeme stejnosměrné napětí v rozmezí $15 - 40\text{ V}$. Podle [16] je k tomu vhodnější neregulovaný zdroj, protože lépe zvládne proudové nárazy. Při použití regulovaného zdroje je nutné volit zdroj schopný dodat vyšší proud, než je nominální proud motoru. Napájení bylo voleno také s ohledem na možnost dodatečného rozšíření funkcionality tiskárny.

Byl vybrán zdroj PS 100/24 (obr. 4.9) dodávaný e-shopem cncshop.cz, který má 3 výstupní svorkovnice s neregulovaným napětím 24 V/ 4 A (možnost rozšíření tiskárny o další motory pro recoating systém či automatické odklopení projektoru) a 2 svorkovnice s regulovaným výstupem 12 V/ 1 A (pro napájení mikrokontroleru v případě, že nebude stačit napájení přes USB port počítače – při doplnění tiskárny o další prvky připojené k mikrokontroleru, např. o koncové spínače).

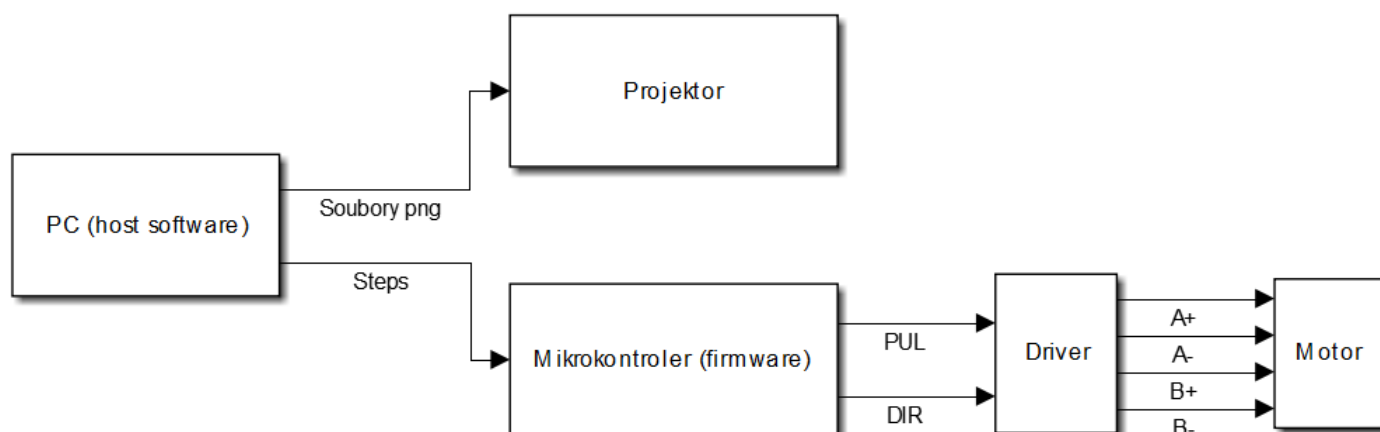


Obr. 4.9: Zdroj PS 100/ 24

5 Software

5.1 Struktura řízení

Řízení stereolitografických 3D tiskáren s projektorem má obvykle strukturu znázorněnou na obr. 5.1:



Obr. 5.1: Struktura řízení

Z PC jsou posílány řídicí povely mikrokontroleru, ten na jejich základě generuje signály driveru, který dále vytváří sekvence buzení jednotlivých fázových vinutí motoru potřebné pro uskutečnění požadovaného pohybu. Řízení tedy bývá realizováno v otevřené smyčce, jak je u aplikací používajících krokového motoru zvykem. Kromě posuvu osy z musí program běžící na PC, tedy host software, obsluhovat projektor.

Další možností by bylo vynechání mikrokontroleru a generování řídicích signálů pro driver motoru přímo z PC. To by však samozřejmě vyžadovalo složitější host software, jenž v tomto případě zpravidla využívá programů na řízení CNC strojů z PC. Zřejmě nejrozšířenějším z těchto programů je Mach3. Samotný host software pak bývá řešen pouze jako makro pro Mach3, které s pomocí např. Microsoft Powerpointu zajišťuje kromě povelů k posuvu také ovládání projektoru (např. Jon Watson Macro: <http://www.chemshapes.com/?p=388#comments>). Mach3 však řídí driver přes LPT port, kterým ale dnešní počítače běžně nebývají vybaveny a bylo by proto potřeba použít HW interpolátoru připojeného na USB portu (redukce USB na LPT není plnohodnotnou náhradou LPT a pro účely řízení CNC strojů je podle [17]

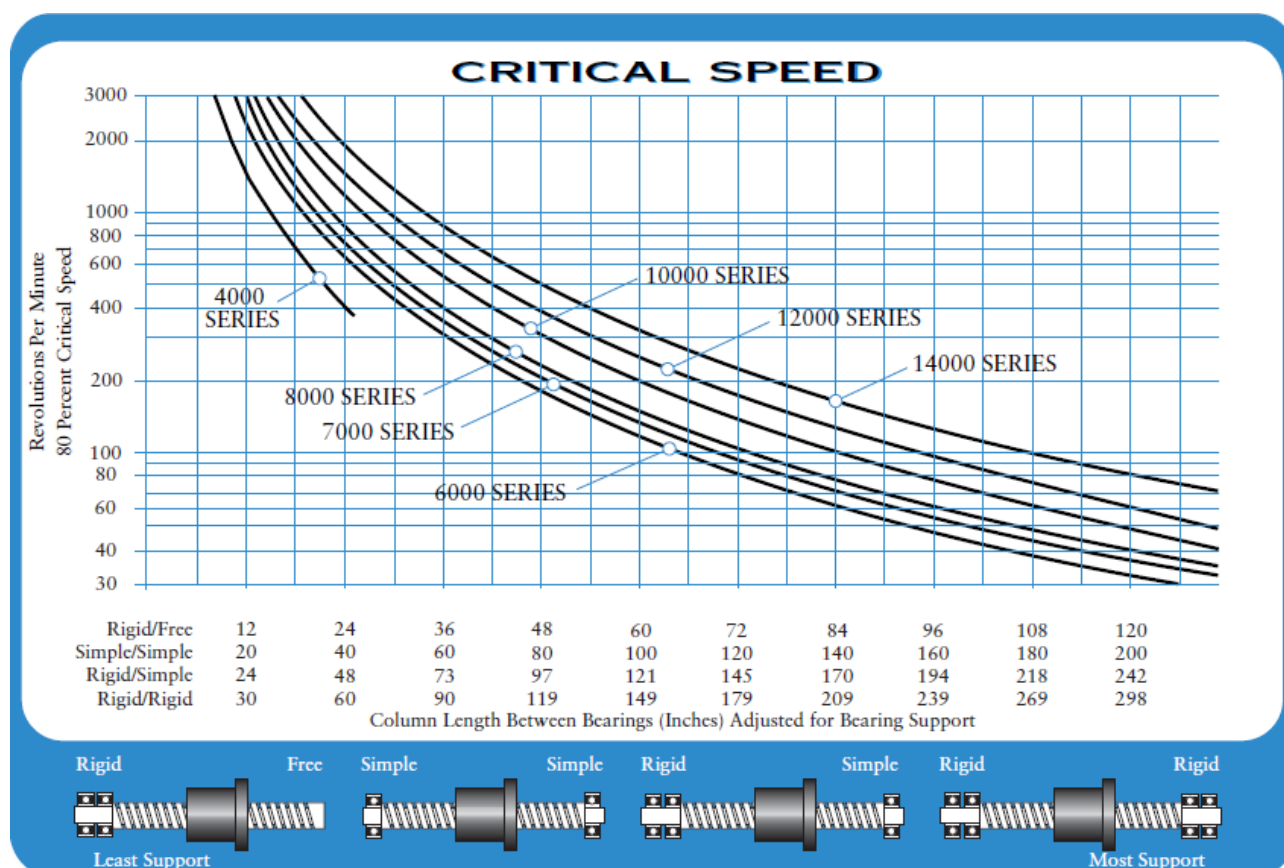
nedostačující). Struktura řízení by se tedy nijak nezjednodušila, mikrokontroler by byl pouze nahrazen HW interpolátorem, který by zastával jeho funkci a generoval by signály *DIR* a *PUL* pro driver. Protože by tedy zůstala pouze nevýhoda nekomfortního a složitějšího host softwaru, byla volena první popsaná možnost – řídicí struktura s mikrokontrolerem.

Na internetu je sice k volnému stažení nabízena řada host softwarů a firmwarů, žádný z nalezených však bez úprav nedovoloval provádět sesuv plošiny s podjetím, čili ve dvou fázích. Místo úpravy již existujících programů bylo upřednostněno vytvoření nového firmwaru i host softwaru na míru našim požadavkům.

5.2 Firmware

Firmware je označení pro program běžící v embeded zařízeních, jakým je například právě Arduino. Program čeká na příkazy z nadřazeného řízení přicházející z hostwaru běžícím na PC a generuje pro výkonovou elektroniku motoru signály *DIR*, *PUL* a *OPTO* (slouží k napájení optočlenů driveru, je neustále na úrovni *high*) spouštějící naprogramované sekvence pohybu (viz obr. 5.1).

Protože v řídicí struktuře chybí zpětná vazba poskytující údaje o skutečné hodnotě natočení motoru, je třeba věnovat pozornost určení maximální rychlosti motoru, při které ještě nedochází ke ztrátě kroku (s rostoucí rychlostí krokovým motorům začne klesat moment). Tato rychlost by také neměla překračovat limity dané ostatními komponentami: šroubem, driverem a mikrokontrolerem. Maximální rychlost otáčení šroubu určíme z obrázku 5.2 (114 mm je cca 4,49“):



Obr. 5.2: Maximální rychlost otáčení posuvného šroubu
(převzato z katalogu Kerk na [14])

Pro námi užívaný typ uložení (rigid, simple) je kritická rychlost mimo rozsah grafu, je tedy zřejmé, že bude vyšší než 3000 *ot/min*. Dále se musí zohlednit limity driveru a mikroprocesoru. Podle [18] Arduino umí použitím příkazu *DelayMicroseconds* generovat pouze pulsy delší než 3 μs . Podle manuálu driveru je minimální přípustná délka pulsu *PUL* 1,5 μs a signál *DIR* musí předbíhat signál *PUL* minimálně o 5 μs . Délka pulsu je v programu zavedena jako proměnná *zpozdeni*. Protože k motoru SX 17 – 1003 nejsou dostupné momentové charakteristiky, byla maximální rychlost při zatížení osy břemenem určena experimentálně. Maximální rychlost je 630 *ot/min*, což je hodnota dostatečně vzdálená od kritické rychlosti otáčení šroubu. Podle rovnice (10):

$$zpozdeni = \frac{500000}{n \cdot \text{kroků} / \text{ot}} = \frac{500000}{(630/60) \text{ ot} / \text{s} \cdot 800 \text{ kroků} / \text{ot}} = 57,7 \mu s \quad (10)$$

jsou splněny také požadavky Arduina na délku pulsu. Přidáním zpoždění 5 μs mezi vytvoření signálu *DIR* a generování signálu *PUL* budou splněny i požadavky driveru.

Maximální rychlostí bude proveden pouze poslední zdvih, který vyzvedne už hotový výrobek nad úroveň nádoby s fotopolymérem, aby tak usnadnil vyjmutí součásti. Generování signálu *PUL* bylo uskutečněno v cyklu *for*, přičemž jedno provedení

příkazů v cyklu vyšle signál pro vykonání jednoho kroku. Při testech se ukázalo, že Arduino má limit pro čítače cyklů *for* a *while*. Limitní hranicí je cca 9500 cyklů a maximální rozměr součásti v ose *z* je 100 mm, což odpovídá 20000 krokům. Celý posuv jsme byli nuceni rozdělit na dva poloviční posuvy.

Pro sesunutí plošiny o tloušťku jedné vrstvy dolů byla naprogramována sekvence pohybů. Plošina nejprve sjede rychlostí 200 *ot/min* o tloušťku vrstvy a 2 mm dolů a poté vyjede o 2 mm nahoru rychlostí 400 *ot/min*. Tím se zajistí překrytí již vytvrzené vrstvy doposud nevytvrzenou pryskyřicí. Při prostém posuvu o tloušťku jedné vrstvy dolů trvalo překrytí vytvrzené vrstvy dlouhou dobu či k němu vůbec nedošlo. Rychlosti obou pohybů sekvence byly určeny experimentálně tak, aby celkový čas posuvu přibližně odpovídal času potřebnému pro překrytí vytvrzené vrstvy tekutou pryskyřicí. Hodnota podjetí byla rovněž určena pokusy a to tak, aby bylo dosaženo minimální doby mezi jednotlivými osvity; podjetí je tedy tak malé, aby pohyb netrval zbytečně dlouho, ale dost velké k tomu, aby došlo k rychlému překrytí (při podjetí do větších hloubek je díky hydrostatickému tlaku překrytí rychlejší). Bylo dbáno také na to, že při podjetí žádané polohy nesmí být vytlačeno přetokovou drážkou příliš mnoho tekutiny. Pokud by se úroveň hladiny (a tím i vzdálenost mezi objektivem a hladinou) výrazně změnila, projektor by na hladinu nepromítal ostrý obraz.

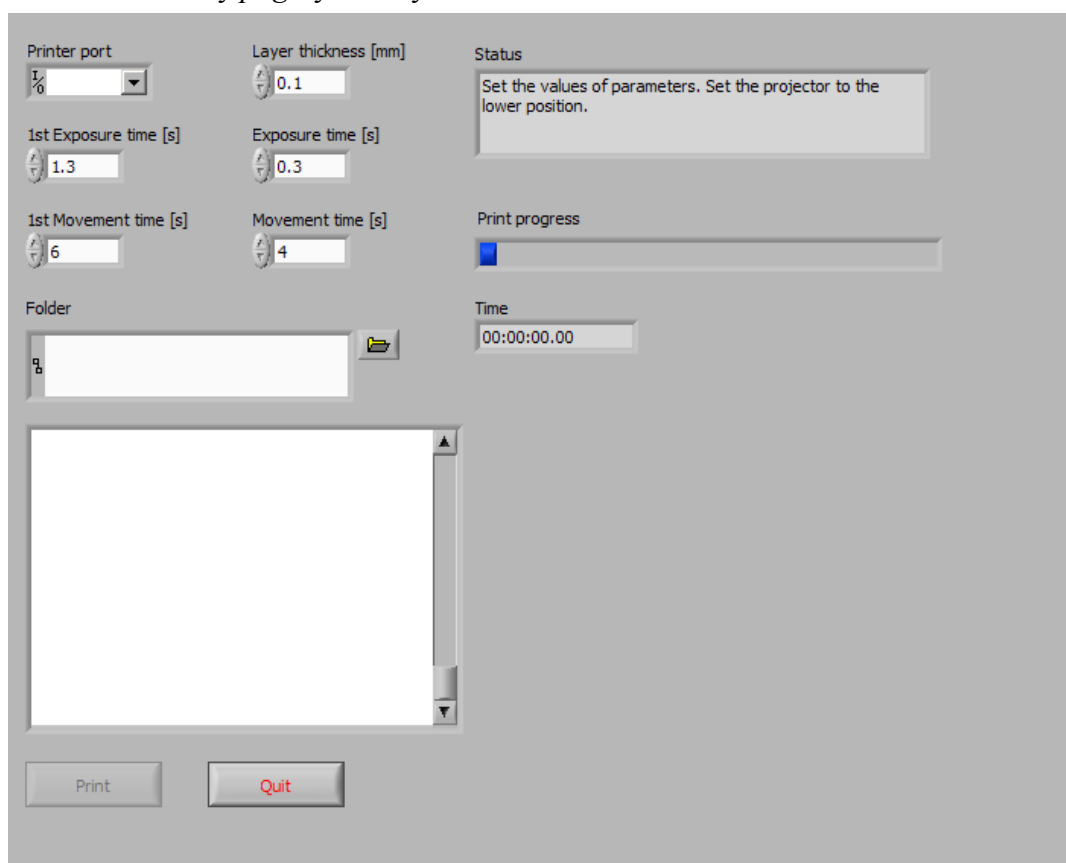
5.3 Host software

Program na projektoru zobrazuje soubory ve formátu *png* vytvořené v sliceru z 3D modelu a posílá po USB řídicí signál pro mikrokontroler, který ovládá driver. Byl vytvořen v prostředí LabView 2013, je proto potřeba před spuštěním nainstalovat NI Run-Time Engine verzi 2013 a VISA ovladače pro USB port. Obojí lze zdarma stáhnout z webu NI. Pro správnou funkci programu musí být připojený projektor nastaven jako rozšíření plochy. Další prerekvizitou nutnou pro bezchybný tisk je nastavení plošiny do předem definované výchozí polohy.

Výchozí poloha plošiny je cca 8,5 mm nad hladinou fotopolymery. Po spuštění projektoru se nejprve promítá úvodní obrazovka - bílé logo Acer. Zvolená výchozí poloha plošiny tak umožňuje zapnout projektor i po spuštění programu, protože úvodní obrazovka je promítána na plošinu nad hladinou, nikoli na hladinu, kde by způsobila nechtěné vytvrzování fotopolymery. Plošina však musí být očištěna, jinak by vytvrzením loga ve vrstvě pryskyřice ulpívající na plošině došlo k narušení tisknuté součásti.

Po spuštění programu je projektorem promítána černá plocha, program čeká na nastavení parametrů tisku. Uživatel nastavuje (obr. 5.3):

- port tiskárny
- tloušťku vrstvy,
- čas expozice 1. vrstvy,
- čas expozice následujících vrstev,
- dobu trvání posuvu před expozicí 1. vrstvy
- dobu trvání před expozicí ostatních vrstev
- adresář se soubory *png* vytvořený slicerem



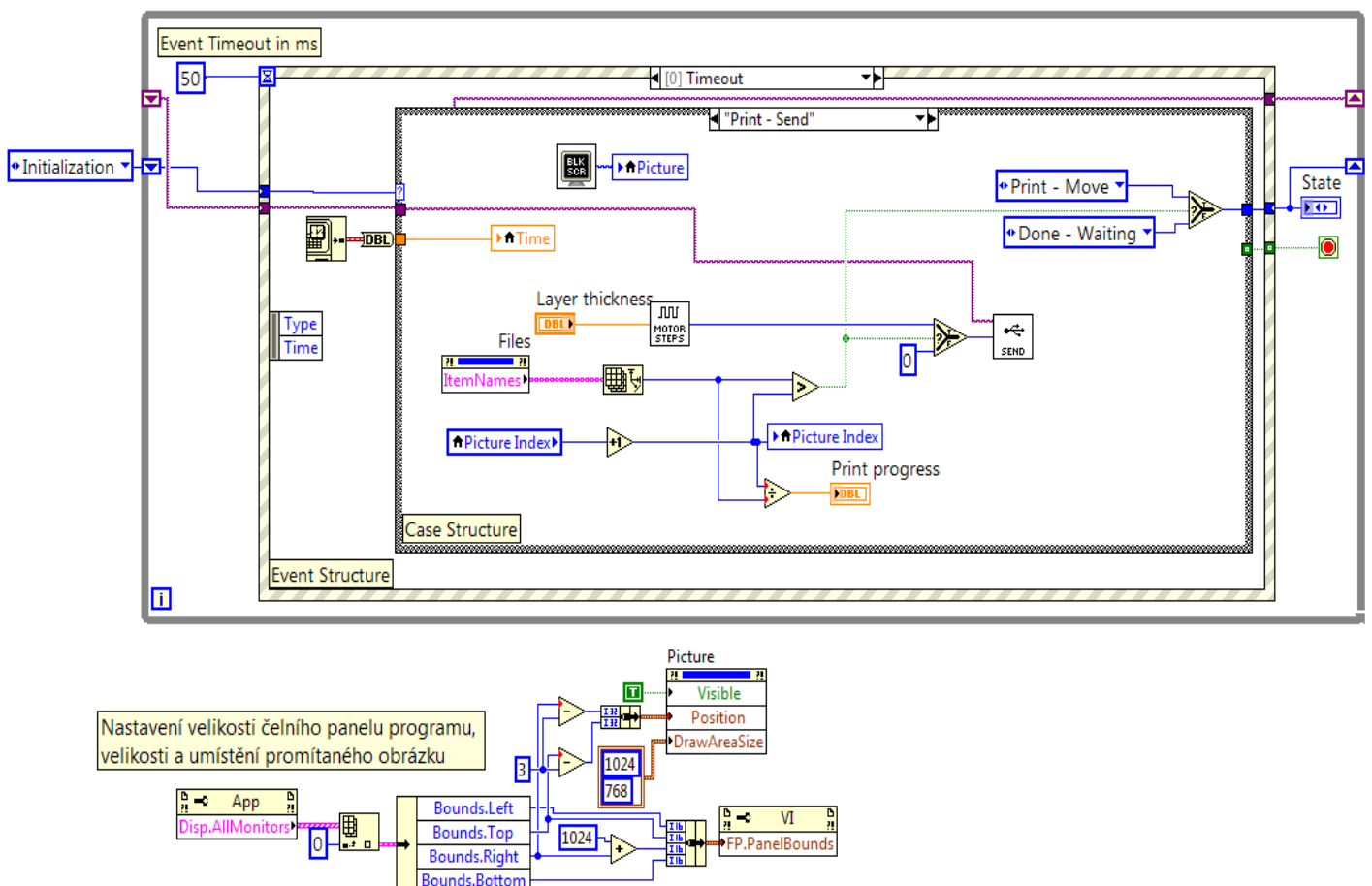
Obr. 5.3: Host software

Tloušťku vrstvy lze nastavovat kontrolkou *Layer thickness* a to s rozlišením $0,005\text{ mm}$. Takového posuvu bude dosaženo, natočí-li se motor o jeden krok. Počet kroků je zapisován před čekáním na vykonání posuvu na nastavený port tiskárny. Kladná hodnota poslaná mikrokontroleru znamená posuv o příslušný počet kroků dolů, záporná hodnota pak spouští posuv o daný počet kroků vzhůru (na obr. 5.1 je číslo odeslané mikrokontroleru značeno *Steps*).

První vrstva tisku je vytvořena promítáním modré na celé ploše. Tato vrstva má tloušťku nastavenou na cca $0,5\text{ mm}$ a tvoří základnu, na níž se bude součást tisknout.

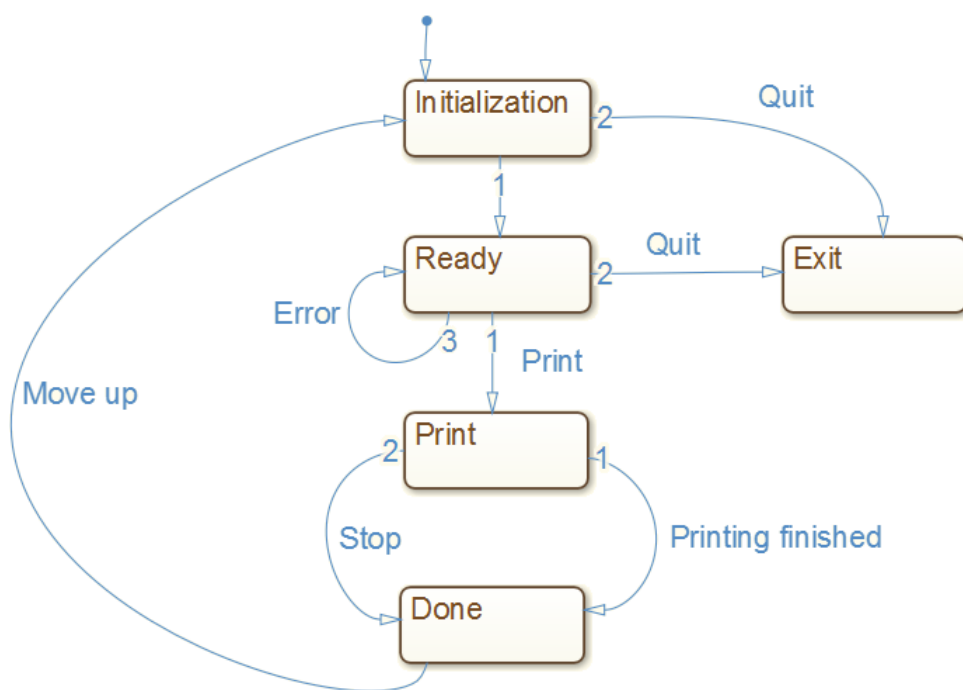
Účelem základny je vyrovnaní nerovnoběžnosti plošiny s hladinou a zajištění přilnutí výrobku k plošině, aby se tak zabránilo odplavání výrobku při jejím sesouvání. Tisk takovéto základny je u SLA tiskáren používajících projektor běžné a tiskne se i ve více vrstvách. Kvůli zajištění přilnutí je důležité dokonalé vytvrzení základny, čas expozice první vrstvy je proto o něco delší, než by pro vytvrzení vrstvy silné 0,5 mm bylo potřebné. Doba expozice pro první vrstvu byla na základě provedených experimentů nastavena na 1,3 s.

Časy expozic i posuvů jsou nastavitelné po 0,05 s. Jak ukazuje obrázek 5.4, program je koncipován jako *State Machine* s *Event Structure*. Samotný tisk se provádí v *Case Structure*, která je obsluhována během události *Timeout* v *Event Structure* a to tehdy, nespustí-li se do vypršení nastavené doby *timeoutu* žádná jiná událost. Právě hodnota *timeoutu* je faktorem limitujícím rozlišení parametrů tisku majících charakter definice časových úseků. Toto rozlišení bylo shledáno jako plně dostačující a vzhledem k chybám v řádu setin sekundy, jež byly pozorovány indikátorem *Time* (viz obr. 5.3), by bylo nastavování menší hodnoty *timeoutu* jen zbytečným zatěžováním procesoru.



Obr. 5.4: Struktura host softwaru

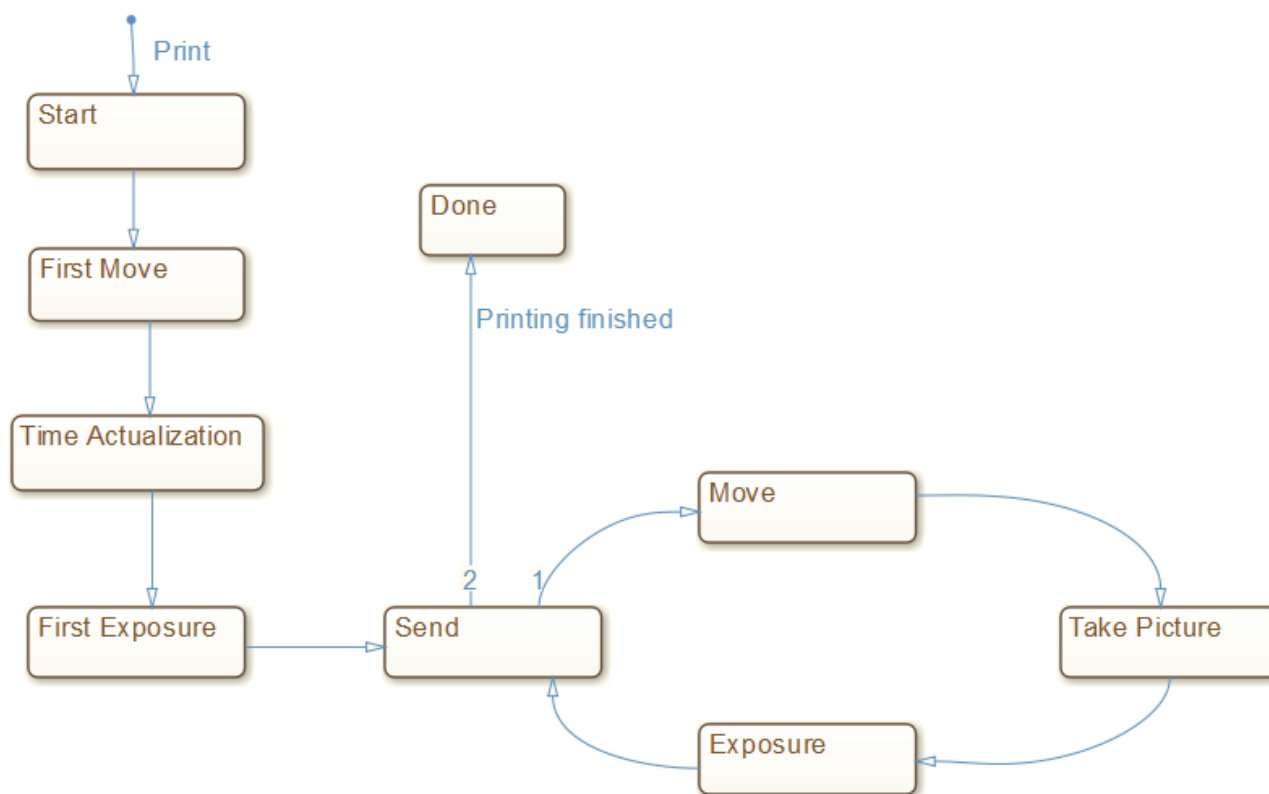
Po spuštění programu proběhne inicializace ve stavu *Initialization*. Projektorem je promítána černá plocha. Poté se program dostane do výchozího stavu *Ready*, ve kterém čeká na akce uživatele. Tlačítko *Quit* slouží k přechodu do stavu *Exit*, tisk se spouští tlačítkem *Print*. Ve stavu *Exit* je po uzavření nastaveného portu tiskárny ukončen program. Stlačení tlačítka *Print* je možné až po zvolení adresáře obsahujícího průřezy součásti v obrázcích uložených jako *png*. Názvy těchto souborů se zobrazí v okně *Files* v pořadí, v jakém budou zobrazovány projektorem. Při stisknutí tlačítka *Print* se otevírá port definovaný v *Printer port*. Případná chyba při pokusu o připojení na port tiskárny je zobrazena v okně *Status*, které slouží ke komunikaci s uživatelem. V tomto případě se program vrátí do výchozího stavu po hraně *Error*. V opačném případě se program přesune do skupiny stavů *Print* a provádí tisk. Tlačítko *Quit* je během tisku nahrazeno tlačítkem *Stop*. Při zastavení tisku tlačítkem *Stop* nebo poté, co projektor zobrazí poslední průřez v adresáři, program přejde do skupiny stavů *Done*, odkud se vrací do stavu *Initialization*. Základní stavový diagram je na obrázku 5.5:



Obr. 5.5: Základní stavový diagram host softwaru

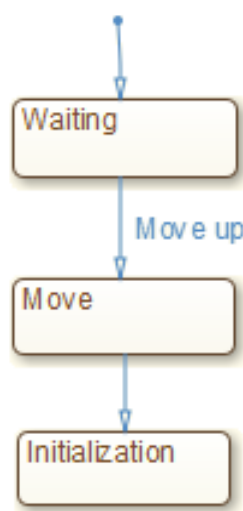
Při spuštění tisku se ve stavu *Start* vyřadí a ztmaví kontrolky programu a pošle se signál pro posuv plošiny. Plošina sjede z výchozí polohy o 8,5 mm dolů, tedy 0,5 mm pod hladinu fotopolymery. Na ukončení posuvu program čeká ve stavu *First Move* po čas definovaný kontrolkou *1st Movement time*. Pak dojde ve stavu *Time Actualization* k aktualizaci času uloženého v lokální proměnné *Time*, která je zobrazována na indikátoru

se stejným názvem. Při první expozici je ve stavu *First Exposure* promítána modrá plocha, trvání první expozice je určeno kontrolkou *1st Exposure time*. Dále program pokračuje do stavu *Send*. V něm se nejdříve vyhodnotí, zda už nebyly zobrazeny všechny průřezy a na základě toho se pošle signál pro posuv plošiny. V případě, že už všechny průřezy byly zobrazeny, program přejde do skupiny stavů *Done*, jinak pokračuje do smyčky tvořené stavy *Move* (čekání na posuv – kontrolka *Movement time*), *Take Picture* (načtení průřezu a aktualizace času) a *Exposure* (promítání – kontrolka *Exposure time*), kterou prochází, dokud nebudou zobrazeny všechny soubory z adresáře. Z jakéhokoliv stavu ze skupiny *Print*, jak již bylo zmíněno, je možné přejít do skupiny *Done* stisknutím tlačítka *Stop*. Stavový diagram skupiny stavů *Print* je znázorněn na obr. 5.6:



Obr. 5.6: Stavový diagram – *Print*

Skupina *Done* sestává pouze ze dvou stavů: *Waiting* a *Move*. Ve stavu *Waiting* je promítána černá a program vyzve uživatele k odklopení projektoru. Právě tlačítko opět mění svoji funkci, nyní nese nápis *Move up* a slouží k vyzvednutí plošiny do výchozí pozice. Po kliknutí na toto tlačítko se ve stavu *Move* pošle povel k pohybu. Po vyzvednutí plošiny se program vrací do stavu inicializace, ve kterém byl po spuštění. Stavový diagram skupiny stavů *Done* je vyobrazen na obr. 5.7:



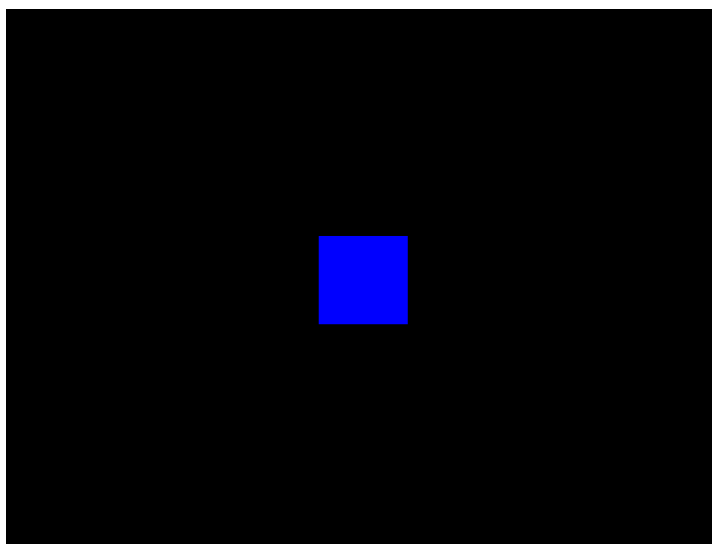
Obr. 5.7: Stavový diagram – *Done*

5.4 Slicer

Jako slicer, tedy program vytvářející z 3D modelu jednotlivé průřezy, byl zvolen program Creation Workshop. Kromě formátu *stl* podporuje i formáty *3ds* a *obj*. Program je volně ke stažení z adresy: <http://www.thingiverse.com/thing:40778>. Slicer je jen jednou z funkcí programu, umožňuje také automatické generování podpor a lze jej používat i jako host software pro SLA či FDM tiskárny.

V programu bylo v záložce *Machine Config* nastaveno rozlišení projektoru a maximální rozměry v osách *x*, *y* a *z* na 20,48 mm x 15,36 mm x 100 mm. Změnou tohoto nastavení se změní rozměry kvádrů umožňujícího rychlou kontrolu rozměrů vyráběné součástí. Hrany tohoto kvádrů jsou zobrazeny šedou barvou na záložce *Model View* společně s 3D modelem součásti. Barva ploch průřezů výrobku byla v menu *File/Preferences* nastavena na základní modrou modelu RGB (viz kapitola 4.1), černá barva

pozadí byla ponechána. Dále je nezbytné v *Slice Profile Config/ Options* zadat tloušťku vrstvy, povolit export a nastavit způsob exportu na možnost *Subdirectory*. Načtením souboru z geometrií součásti a jejím posunutím na střed plošiny (součást na plošině znázorněné modrou mřížkou musí ležet) pomocí ikony *Slice!* vytvoříme adresář s obrázky ve formátu *png* a s vygenerovaným g-kódem v souboru s příponou *gcode*. Obr. 5.8 je jedním z průřezů pyramidy (viz kapitola 6.2) ve vyexportovaném adresáři:



Obr. 5.8: Průřez součásti

6 Tisk

6.1 Ozařování zespod

Při testu vytvrditelnosti fotopolymery modrým světlem popsaném v kapitole 4.1 bylo provedeno několik měření tloušťky vytvrzené vrstvy při různé expoziční době a byl zkoumán vliv příměsí v pryskyřici na průběh vytvrzování.

Výška projektoru byla nastavována podle ostrosti obrazu na stínítku položeném v Petriho misce. Měřením bylo zjištěno, že při ozařování pryskyřice zespod přes dno Petriho misky nebylo možné vytvrdit vrstvu tenčí než cca 0,4 mm (naměřeno při expozici trvající 0,2 s). Při nastavení menšího času expozice se vytvrdila stejně hrubá vrstva, avšak nedokonale. Vytvrzený vzorek se drolil a lámal, byl měkký. Mechanické vlastnosti vytvořených vzorků znemožnily přesnější změřením tloušťky vrstvy, při měření se rozpadaly. Ozařování zespod přes skleněné dno se tedy ukázalo jako nepoužitelné. Na vině je pravděpodobně rozptyl světla procházejícího přes skleněné dno. Záření projektoru pokrývá určitou oblast spektra a vlivem rozdílných hodnot indexu lomu jednotlivých vlnových délek záření se budou paprsky promítaného obrazu za sklem rozbíhat. Místo jedné vzdálenosti, ve které je obraz zaostřen a záření tam dosahuje maximální intenzity (paprsky se tam sbíhají), vznikne oblast, v níž budou postupně zaostřeny paprsky o jednotlivých vlnových délkách. Protože stínítko všechny tyto paprsky absorbuje těsně za sklem a je velmi tenké, zdá se na něm obraz zaostřený, fotopolymery však paprsky prochází do určité hloubky a v oblastech s nejvyšší intenzitou dopadajícího záření sahajících do této hloubky prosvícení způsobí vytvrzení.

Dále byl zjišťován vliv přidávaných barviv či pigmentů na tisk. V této konfiguraci tiskárny bylo pro tisk použito jen malého objemu fotopolymery, jenž byl nalit do misky. Při tisku ve standardní konfiguraci je nutné zaplnit celou nádobu, obarvení takového objemu by však znamenalo kontaminaci většiny zásob materiálu. V prvním testu byl použit červený inkoust Edding BTK 25 - 002 používaný ve fixech. Ve druhém testu byl použit černý toner, který byl s pryskyřicí před přelitím do Petriho misky promíchán v jiné nádobě. Toner však i po důkladném rozmíchání v pryskyřici tvořil shluky. V obou případech jsme podle očekávání dosáhli ztenčení vytvrzené vrstvy, inkoust i toner totiž část přicházejícího světla absorbovali. Při delší době expozice však absorpce světla inkoustem či tonerem vedla ke zkroucení vrstvy vlivem vysoké teploty. Výsledky ukazuje tabulka 1:

Čas [s]	Tloušťka vrstvy [mm]		
	Bez příměsí	Inkoust	Toner
1	1,13	0,8	0,49
0,5	0,69	0,42	0,25

Tabulka 1: Vliv příměsí na tloušťku vrstvy

Výraznějšího ztenčení bylo dosaženo použitím toneru, pohltit více modrého světla. Černý toner pohlcuje všechny vlnové délky přibližně stejně, téměř žádné světlo neodráží, vzorek obsahující toner byl proto více náchylný ke zkroucení. Červený inkoust absorbuje zhruba ve stejném poměru modrou a zelenou, tedy svůj doplněk - azurovou a červenou odráží. Z tohoto hlediska by pro ztenčení vytvrzené vrstvy byla nejvhodnější barvou příměsí žlutá, jejíž absorbovaný doplněk je právě modrá. Na obrázku 6.1 je několik měřených vzorků, na obou vzorcích s tonerem je viditelné jeho nedokonalé rozptýlení, na prostředním a pravém vzorku je viditelná teplem způsobená deformace:



Obr. 6.1: Vzorky s příměsemi

Přidávání barviv či pigmentů je běžně využíváno pro lepší kontrolu tloušťky vytvrzené vrstvy (např. [19]), dokonce se prodávají pryskyřice s pigmenty už smíšené (na [11]). Pigmentů nebo barviv by bylo možné pro ztenčení vrstvy využít i při promítání shora.

6.2 Vliv času expozice na tloušťku vrstvy

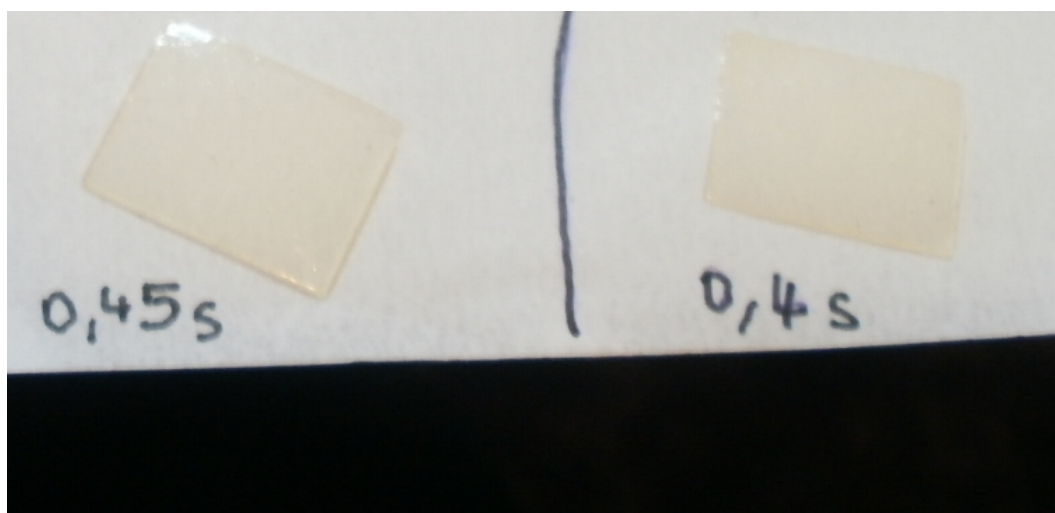
Při prvních pokusech byla měřena tloušťka vytvrzené vrstvy v závislosti na čase. Na základě této závislosti byly později nastavovány parametry tisku.

Měření bylo provedeno na konstrukčně hotové tiskárně. Plošina byla během celého měření neaktivní (byl odpojen pohon osy z) a byla ponořena cca 10 mm pod hladinu, tedy dost hluboko na to, aby nepřekážela při sběru vzorků a aby nezastiňovala fotopolymer v hloubce, ve které by ještě mohlo dojít k jeho vytvrzení. Dolitím pryskyřice až po nastavení plošiny do výše popsané pozice bylo díky přetokové drážce dosaženo požadované úrovně hladiny. Odchylku oproti standardnímu průběhu tisku, při kterém je malý objem kapaliny vytlačen plošinou podjíždějící žádanou polohu, považujeme za zanedbatelnou.

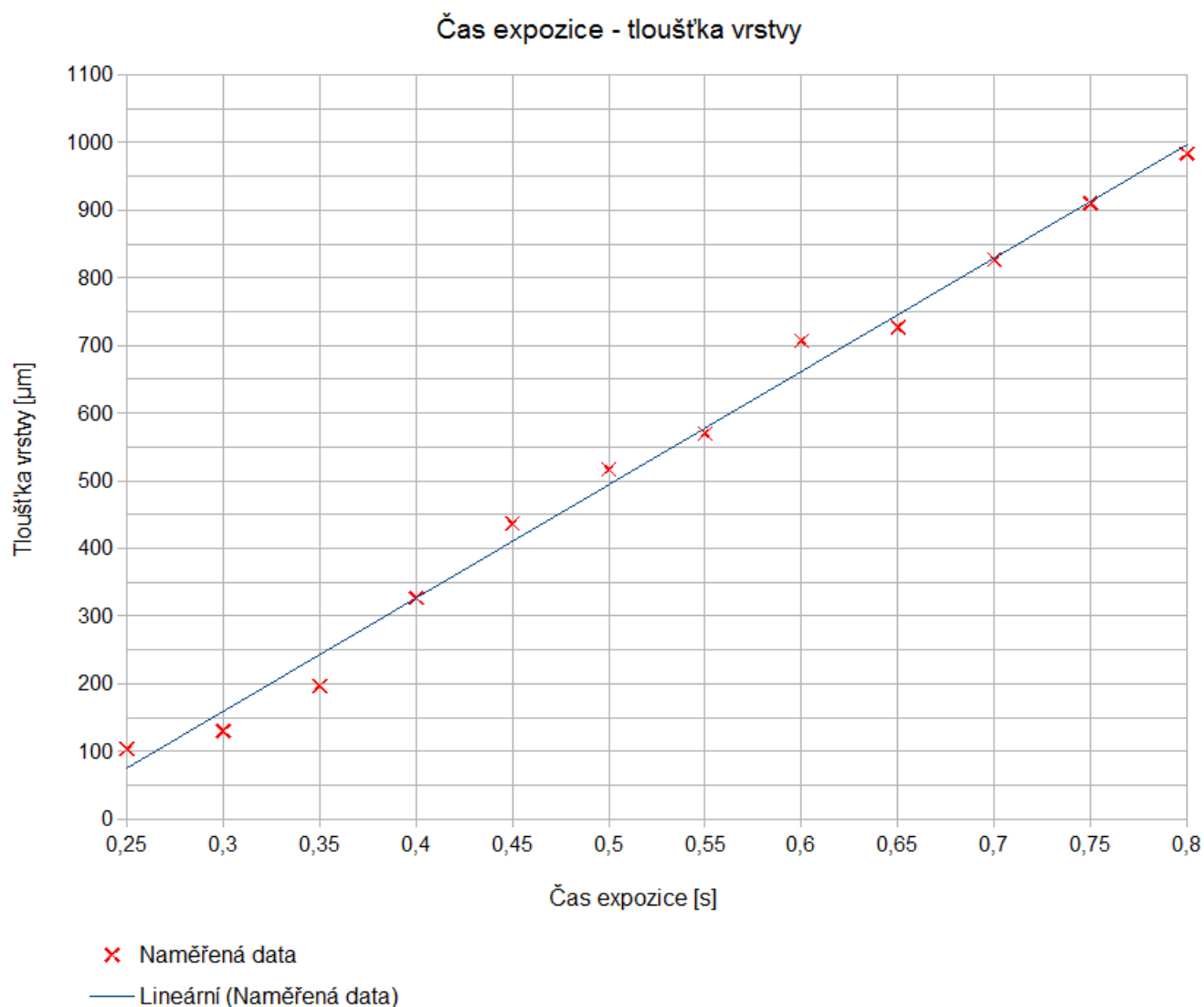
Vzorky byly vytvořeny promítáním modré plochy na hladinu, čas expozice byl nastavován v programu parametrem *1st Exposure time*. Protože program vyžaduje zadání adresáře obsahujícího soubory *png*, byl vytvořen adresář, do kterého byl umístěn obrázek sestávající pouze z černých pixelů. Vytvořené vzorky byly z nádoby vyjmuty plastovou pinzetou, kovová pinzeta způsobovala jejich poničení. Poté byly šetrně osušeny a proměřeny mikrometrem. Aby se předešlo potrhání tenkých vzorků dotyky mikrometru, byly vzorky při měření položeny na papír, jehož tloušťka byla změřena a následně od celkové změřené tloušťky odečtena (obr. 6.2). Dotyk na vřetení mikrometru, který se otáčí s mikrometrickým šroubem, doléhal během měření k papíru, kdežto nepohyblivý pevný dotyk byl přitlačován ke vzorku. Každý vzorek byl měřen desetkrát, do grafu na obrázku 6.3 byly vyneseny expoziční časy a průměrné hodnoty tloušťky jednotlivých vzorků. Mezi veličinami zachycenými v grafu byla jasně patrná lineární závislost, body proto byly proloženy regresní přímkou vytvořenou pomocí metody nejmenších čtverců. Rovnice regresní přímky má tvar (11):

$$LT = 1676,46 \cdot ET - 344,03 \quad (11)$$

Kde LT je tloušťka vrstvy v μm a ET je čas expozice v s .



Obr. 6.2: Vzorky



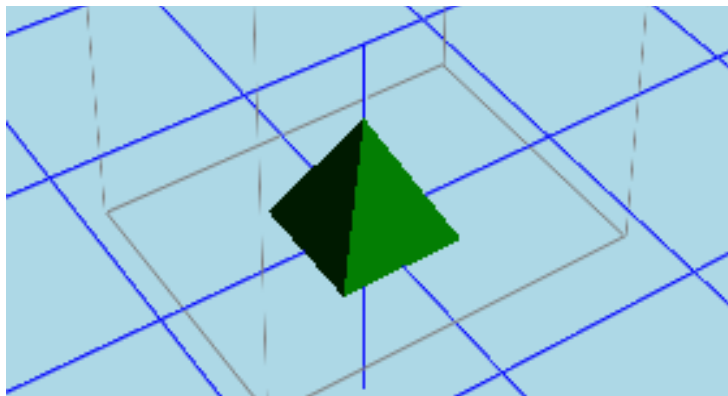
Obr. 6.3: Závislost tloušťky vytvrzené vrstvy na času expozice

Tuto závislost není možné považovat za směrodatnou při nastavování parametrů tisku. Při vícevrstvěm tisku je nutné nastavit delší čas expozice, aby se od sebe vrstvy neoddělovaly, musí se totiž částečně překrývat.

6.3 Určení parametrů tisku

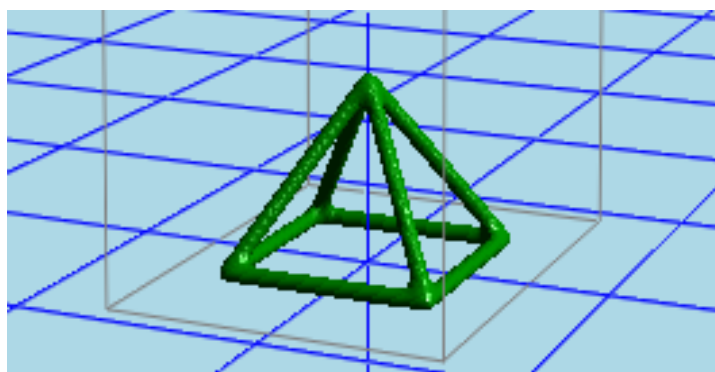
Použité modely byly staženy z: <http://www.thingiverse.com/>. Byly vybírány takové objekty, na nichž bylo možné posoudit kvalitu tisku. Mezi tyto objekty patří zejména:

- pyramida na obr. 6.4, u které jsou na stěnách dobře pozorovatelné jednotlivé vrstvy tisku:



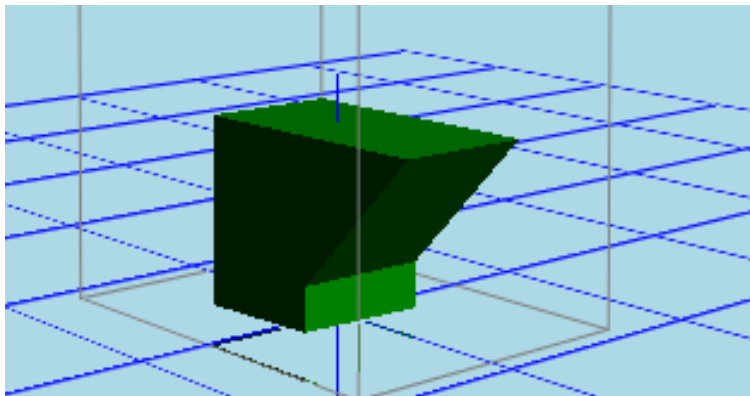
Obr. 6.4: Pyramida

- pyramida sestávající pouze z hran (obr. 6.5), která je poměrně náročná a při špatné soudržnosti vrstev se rozpadá. Kromě toho je na ní, podobně jako u předchozího objektu, dobře pozorovatelná kvalita tisku v rovině x - y . Nevýhodou modelu je, že ke špatnému vytištění často dochází i při správném nastavení parametrů (tzn. při takovém nastavení, se kterým byl jiný model vytisknut v očekávané kvalitě) a to zřejmě vlivem náhodného rušení, které může být způsobeno např. vibracemi stolu, na němž je tiskárna postavena. Jednotlivé průřezy totiž mají ve srovnání s obyčejnou pyramidou malou plochu. Při větší společné ploše dvou po sobě tisknutých průřezů je pravděpodobnější, že další vrstva naváže na předchozí. Vrstvy totiž budou soudržné, i když budou spojeny (budou se částečně překrývat) jen v části společné plochy obou po sobě následujících průřezů. Pokud se ale objeví chyba (nedokonalé vytvrzení, malá tloušťka vrstvy) na vrstvách s malou plochou, další vrstva se na předchozí nejspíše nenaváže. Na větší společné ploše navazujících vrstev bude pravděpodobně více oblastí, ve kterých se budou obě vrstvy překrývat. Této domněnce nahrává i fakt, že problémy byly významnější při menších tloušťkách vrstvy - při tisku většího počtu vrstev pravděpodobnost poškození jedné vrstvy vlivem rušení stoupá.



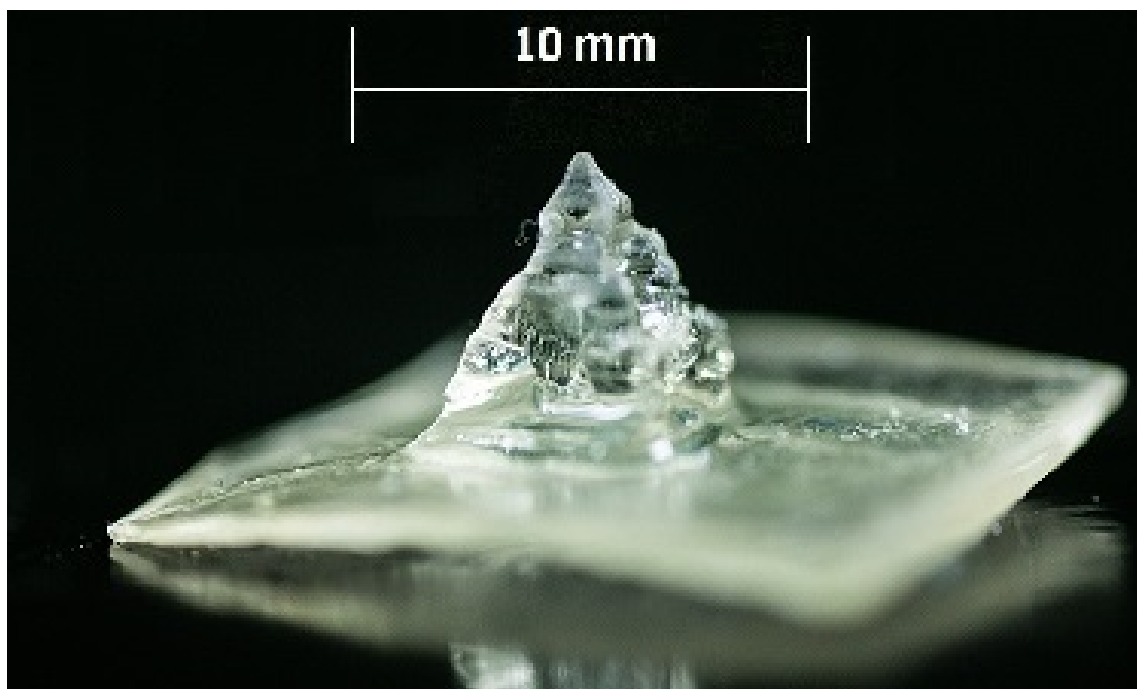
Obr. 6.5: Drátěná pyramida

- kvádr s převisem (obr. 6.6), na němž je možné ověřit lépe než na ostatních objektech, zda není čas expozice příliš dlouhý. Pokud by byla spodní část tělesa protáhlá směrem dolů, bylo by nutné zkrátit čas expozice, znamenalo by to totiž, že tloušťka vytvrzovaných vrstev neodpovídá hodnotě nastaveného posuvu.



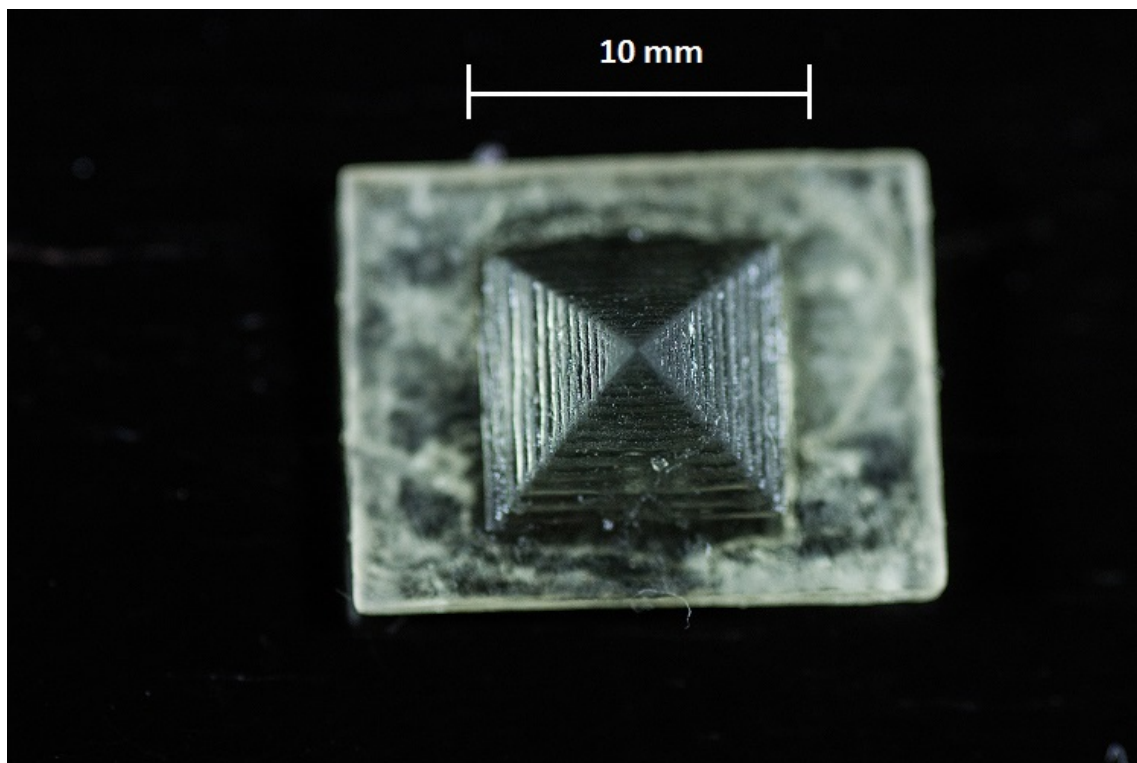
Obr. 6.6: Kvádr s převisem

Nejprve bylo vytištěno několik pyramid. Čas expozice byl nastaven na 0,3 s a byla hledána odpovídající tloušťka vrstvy. Podle našeho předpokladu by hodnota posuvu měla být menší, než tloušťka naměřená v kapitole 6.2, tedy $130 \mu m$. Tloušťka z kapitoly 6.2 byla použita jako počáteční odhad a nastavovaná hodnota posuvu byla zmenšována, dokud pyramida nebyla vytištěna kvalitně. Při hodnotách posuvu blízkých počátečnímu odhadu byla pyramida velmi deformovaná, vytiskly se pouze oblasti blízké středu (obr. 6.7):



Obr. 6.7: Pyramida zdeformovaná díky příliš velkému posuvu

U pyramid s nižšími hodnotami posuvu byly deformace menší, na stěnách byly viditelné nedotisknuté hrany jednotlivých vrstev. Teprve při nastavení posuvu na $100\ \mu m$ byla pyramida vytištěna kvalitně. Stejně bylo postupováno při nastavování hodnoty posuvu odpovídající expozičnímu času $0,25\ s$. Takto stanovená hodnota posuvu byla $40\ \mu m$, výsledek je na obrázku 6.8:

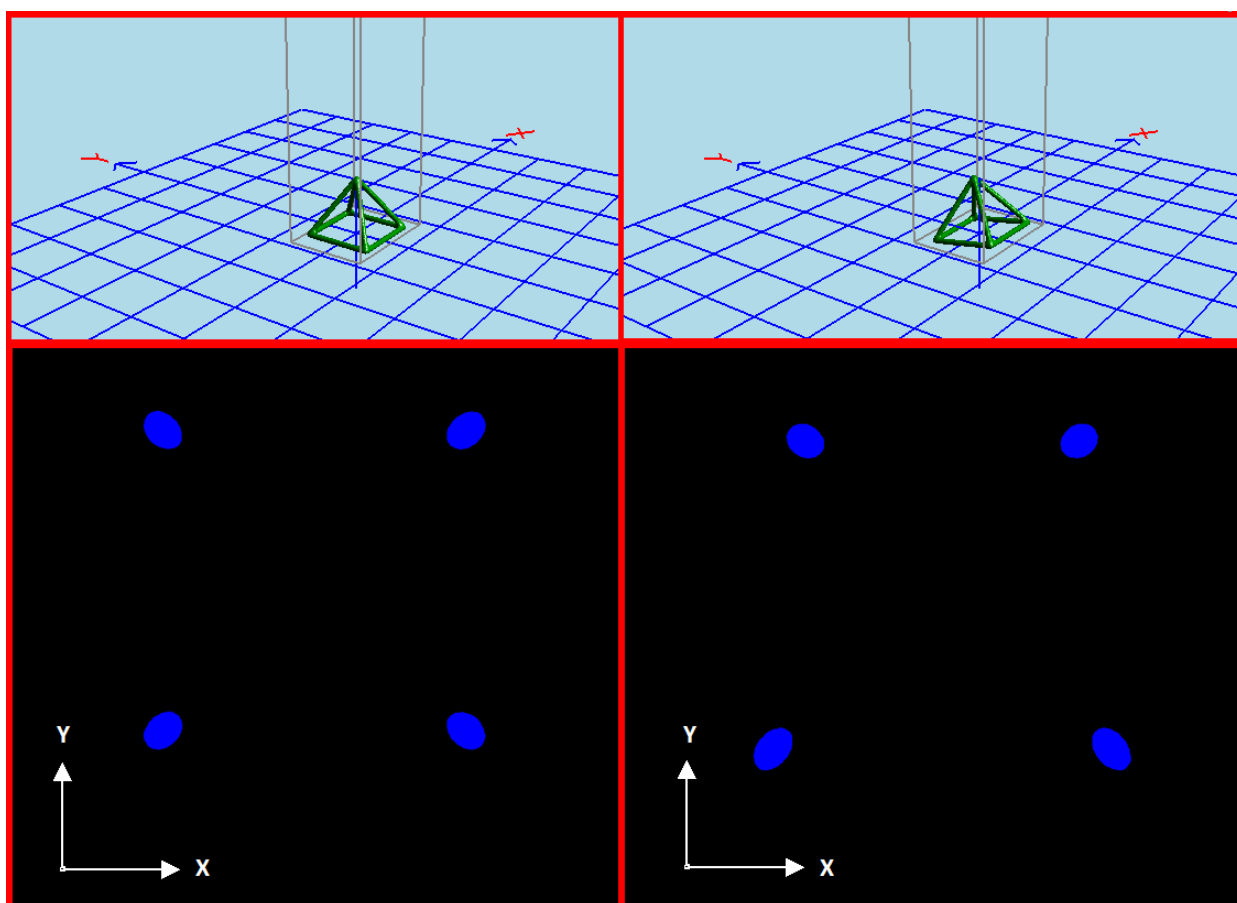


Obr. 6.8: Pyramida – tloušťka vrstvy $0,04\ mm$

Při expozičním času $0,2\ s$ se už nepodařilo dosáhnout kvalitního tisku, na vině je zřejmě kolísání výšky hladiny. Ponořováním plošiny do větší hloubky dojde ke zvednutí hladiny fotopolymery v nádobě, ale protože nastavované posuvy byly příliš malé, nedošlo díky povrchovému napětí k odtoku přebytečné kapaliny při každém sesuvu. Než hladina stoupala nad přetokovou drážku natolik, aby hydrostatický tlak překonal tlak způsobený povrchovým napětím, proběhlo několik posuvů, během kterých hladina postupně stoupala. Projektor tedy nebyl vždy zaostřen na hladinu a to vedlo ke zvětšení ozařované plochy S (ozařovaná plocha S je větší jak ve vzdálenosti kratší než obrazové, paprsky se tam totiž teprve sbíhají, tak ve vzdálenosti větší, kde se už paprsky rozbíhají), čímž se podle rce 12 zmenšuje intenzita záření I_e (zářivý tok Φ_e je dán zdrojem světla, v našem případě je tedy konstantní). Krátká doba expozice při takto snížené intenzitě záření zřejmě nepostačuje pro vytvrzení vrstvy požadované tloušťky.

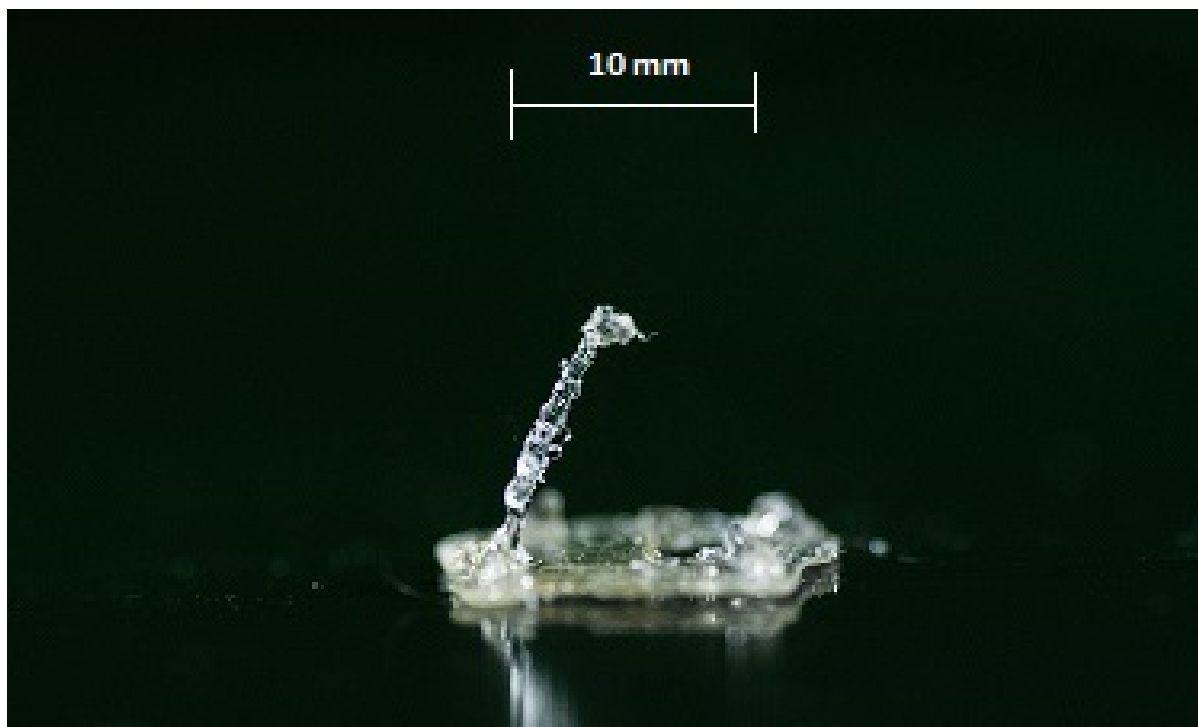
$$I_e = \frac{\Phi_e}{S} \quad (12)$$

Dalším tištěným objektem byla drátěná pyramida. Bylo použito stejné nastavení jako u první vydařené prosté pyramidy, tedy posuv po $100\ \mu m$ při expozičním čase 0,3 s. Kritické nyní bylo správné nastavení dorazů projektoru. Objektiv projektoru bylo nutné dostat do polohy rovnoběžné s hladinou fotopolymery. Při nesprávném nastavení nebyly zhotoveny všechny hrany pyramidy. Byl-li projektor nakloněn například příliš dopředu (byl-li v pantech málo sklopen dolů), nebyly vytištěny zadní hrany. K tomuto jevu docházelo nejspíše proto, že nakloněním dopředu se obraz zdeformuje tak, že v průřezech jsou plochy předních hran zvětšeny a plochy zadních hran naopak zmenšeny. Tímto zvětšením plochy však klesne intenzita dopadajícího záření a nedojde k vytvrzení potřebné vrstvy fotopolymery. Popsaná situace je znázorněna na obr. 6.9 vpravo, na němž je objekt ve sliceru nakloněn o 10° kolem osy x a následně jsou z něj vytvořeny průřezy (dosáhneme tak stejného výsledku jako v případě projektoru nakloněného o 10° dopředu):



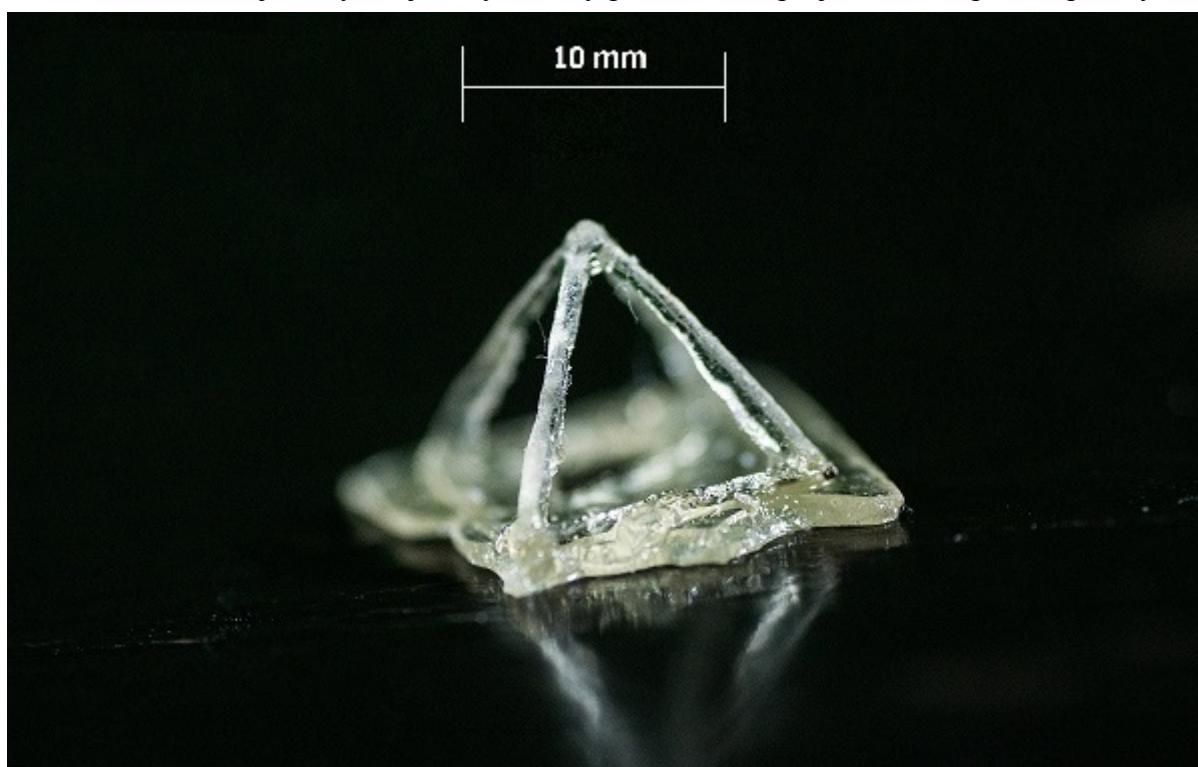
Obr. 6.9: Vliv naklonění projektoru - vlevo správné, vpravo naklonění kolem osy x

Na obrázku 6.10 je zachycena pyramida vytisknutá při špatném nastavení obou dorazů:



Obr. 6.10: Drátěná pyramida - zmetek

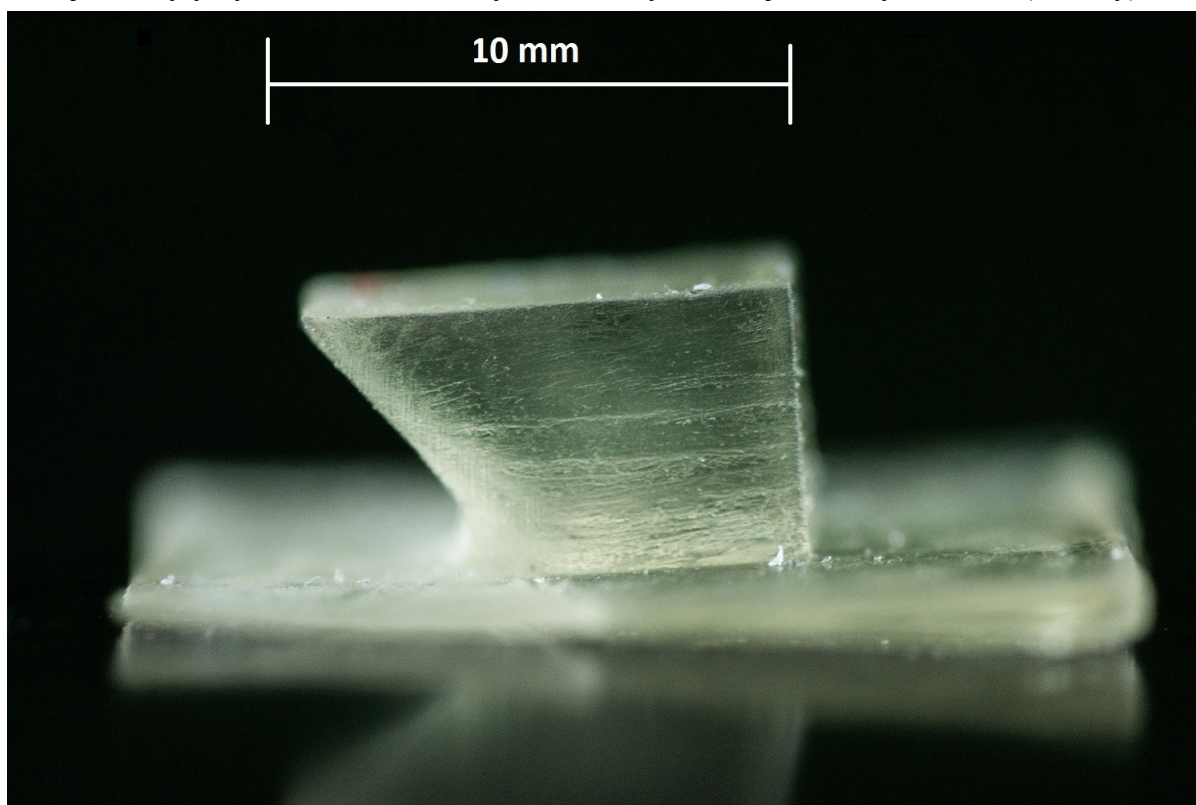
Na obrázku 6.11 je tentýž objekt vytisknutý po nastavení projektoru do správné polohy:



Obr. 6.11: Drátěná pyramida

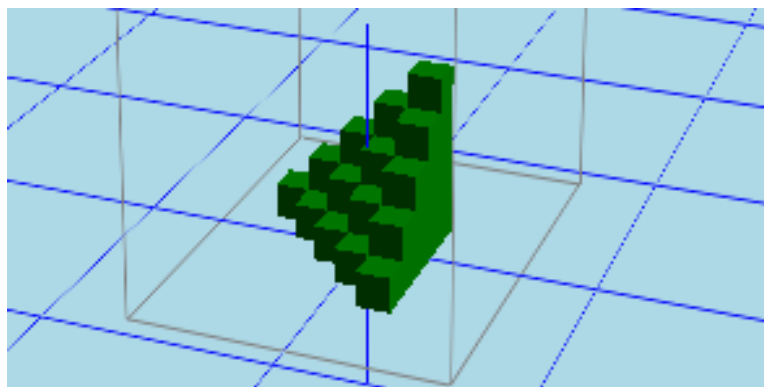
Při expozičním čase 0,25 s se nepovedlo celý objekt vytisknout, zřejmě kvůli náhodným chybám, jež vždy způsobily zhroucení alespoň jedné hrany.

Přesnost nastavení posuvu proto byla u této doby expozice ověřena na kvádr s převisem. Při nastavení času expozice na 0,25 s a posuvu 0,04 mm však docházelo k chybnému vytištění převisu, byl protáhlý směrem dolů, což svědčilo o příliš nízké hodnotě posuvu – vytvrzovaná vrstva polymeru byla příliš silná, takže po posuvu dolů byla vytvrzována nejen vrstva nová, nýbrž i vrstvy předcházející. Posuv byl proto postupně zvyšován, dokud převis nenabyl správného tvaru. Toho bylo dosaženo při nastavení posuvu na 0,06 mm (obr. 6.12). Při této hodnotě se však snížila kvalita stěn objektu, byly nyní viditelné náznaky nedotištěných hran jednotlivých vrstev (dutinky).



Obr. 6.12: Kvádr s převisem

Protože k tisku pyramidy bylo nutné při expozičním čase 0,25 s nastavit jinou hodnotu posuvu, byl s tímto expozičním časem proveden další test. Byl tisknut objekt na obr. 6.13, který ještě lépe než pyramida ukazoval ostrost tisku v rovině x - y :



Obr. 6.13: Kostky

Nejprve jsme použili nastavení určené na kvádr s převisem. Výsledek ukazuje obr. 6.14:



Obr. 6.14: Kostky - nastavení podle krychle s převisem

Je zřejmé, že kvalita vyrobeného objektu byla nevyhovující, hrany byly zaoblené, v některých místech byly téměř nerozeznatelné. Parametry tisku byly tedy nastaveny podle výsledků testů s pyramidou. Jak jde vidět na obrázku 6.15, vytištěný objekt měl nyní jasné a ostré hrany a plochy bez propadlin:



Obr. 6.15: Kostky – nastavení podle pyramidu

Obecně lze tedy říci, že při expozičním čase 0,25 s je vhodná hodnota posuvu závislá na konkrétním tištěném objektu a našich požadavcích na něj, přičemž je třeba najít kompromis mezi kvalitou hran (malý posuv) a kvalitou převislých ploch (větší posuv). U expozičního času 0,3 s se jako vhodná délka jednoho posuvu ukázala 0,1 mm. Předpokládáme, že k dalšímu zvýšení kvality tisku by dopomohlo barvivo či pigment ve fotopolymeru a použití recoating systému.

7 Závěr

Cílem práce byl kompletní návrh a následná realizace stereolitografické 3D tiskárny využívající DLP projektor s požadavkem vysoké přesnosti tisku. Podařilo se docílit požadované velikosti voxelu $0,002\text{ mm} \times 0,02\text{ mm} \times 0,1\text{ mm}$ a byl splněn i požadavek na maximální výšku tisknuté součásti 100 mm .

Po úvodu do problematiky 3D tisku byla v první kapitole rozebrána nejčastěji používaná konstrukční řešení stereolitografických tiskáren. Na základě srovnání jejich vlastností byla vybrána koncepce ozařování shora. Předpoklad, že při použití vhodné pryskyřice nebude k dosažení zadaných parametrů nutné použít recoating systému byl při experimentech popisovaných v 6. kapitole potvrzen.

Druhá část práce popisovala návrh konstrukce tiskárny a výběr vhodných komponent k realizaci návrhu konstrukce. Kostra byla sestavena z dílů systému Item a díky tomu se značně zjednodušila montáž celé tiskárny. Polohovací osu z tvoří posuvný šroub, jeho matice, dvě lineární vedení a plošina, na které se výrobek vytváří. Uchycení projektoru umožňuje přesné nastavení pomocí dorazů tvořených šrouby a odklápění projektoru, které dovoluje snadné odebrání i vysokých výtisků.

V kapitole Elektronika byla zdůvodněna volba projektoru Acer X1240 a byl popsán postup při změně polohy objektivu. Byl proveden výpočet potřebného momentu, na jehož základě byl zvolen motor. Dále byl popsán použitý driver krokového motoru, jeho nastavení a význam regulace proudu ve vinutích motoru. Pro řízení byl vybrán mikrokontroler Arduino. Napájecí zdroj byl vybrán tak, aby umožňoval rozšířit funkcionalitu tiskárny například doplněním recoating systému, koncových spínačů či motorů pro sklápění projektoru.

V rámci práce byl vytvořen software pro embeded zařízení (firmware) přijímající povely z nadřazeného řízení softwarem, který slouží ovládání tiskárny přes PC (host software). Host software kromě toho posílá projektoru data ze sliceru, což je program převádějící soubor s 3D modelem na adresář s průřezy součásti provedenými kolmo na osu z ve formátu *png*.

Při nastavování parametrů tisku byla jako vodítko použita naměřená závislost expozičního času na tloušťce vytvrzené vrstvy. Ta se však od nastavení potřebného pro vícevrstvý tisk mírně odlišovala, bylo proto nutné provést řadu zkušebních tisků. Tisknuté objekty byly vybírány tak, aby vypovídaly o kvalitě tisku a umožnily doladění tiskárny (posuv dorazů projektoru, úpravy ve firmwaru, nastavení parametrů tisku v host softwaru). Po řadě neúspěšných tisků se nám nakonec podařilo dosáhnout požadované přesnosti tisku.

Závěrem lze konstatovat, že vytyčené cíle práce byly beze zbytku splněny.

8 Seznam použitých zdrojů

- [1] PHAM, D a S DIMOV. Rapid manufacturing: the technologies and applications of rapid prototyping and rapid tooling. New York: Springer, c2001, xii, s. 6 ISBN 18-523-3360-X
- [2] SRICHAND HINDUJA, Kuang-Chao Fan. Proceedings of the 35th International MATADOR Conference formerly the International Machine Tool Design and Research Conference. Berlin: Springer, 2007. ISBN 978-184-6289-880. Dostupné z: http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-84628-988-0_76#page-2
- [3] GUO, Nannan a Ming C. LEU. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. Frontiers of Mechanical Engineering. 2013, vol. 8, issue 3, s. 215-243. DOI: 10.1007/s11465-013-0248-8. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11465-013-0248-8>
- [4] BAGARIA, Vaibhav, Darshana RASALKAR, Shalini JAIN a Jami ILYAS. Medical Applications of Rapid Prototyping - A New Horizon. Advanced Applications of Rapid Prototyping Technology in Modern Engineering. InTech, 2011-09-22. DOI: 10.5772/20058. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/advanced-applications-of-rapid-prototyping-technology-in-modern-engineering/medical-applications-of-rapid-prototyping-a-new-horizon>
- [5] THAYER, Jeffrey S. Competitive strategic advantage through disruptive innovation dc by Jeffrey S. Thayer. Cambridge, 1996. oclc: 35749974. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/1721.1/10954> . Thesis (M.S.). Massachusetts Institute of Technology. Vedoucí práce James M. Utterback.
- [6] STRATASYS LTD. Rapid Prototyping [online]. [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/resources/rapid-prototyping>
- [7] LOU, Alex a Carol GROSVENOR. Selective Laser Sintering: Birth of an Industry. In: Mechanical Engineering at The University of Texas at Austin [online]. Austin, Texas, 7. 12. 2012, 30. 5. 2013 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: http://www.me.utexas.edu/news/2012/0712_sls_history.php#glossary
- [8] IKUTA, K. a K. HIROWATARI. Real three dimensional micro fabrication using stereo lithography and metal molding. [1993] Proceedings IEEE Micro Electro Mechanical Systems. IEEE, 1993, s. 42-47. DOI: 10.1109/MEMSYS.1993.296949. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=296949>
- [9] KELLER, Petr. Programování a řízení CNC strojů. [online]. [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: http://www.kvs.tul.cz/download/cnc_cadcam/pnc_2.pdf
- [10] HIWIN S.R.O. Lineární vedení [online]. [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: http://www.hiwin.cz/media/files/01_Linearni_vedeni.pdf

- [11] SPOT-A MATERIALS. [online]. 2014 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: http://www.hiwin.cz/media/files/01_Linearni_vedeni.pdf
- [12] SEDGWICK. Sedgwick 3D DLP: Sedgwick 3D DLP Printer ready to print [online]. 2014 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://sedgwick3d.com/p/9/sedgwick-3d-dlp-printer-ready-to-print>
- [13] DOUGLASS, M.R. Lifetime estimates and unique failure mechanisms of the Digital Micromirror Device (DMD). 1998 IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings 36th Annual (Cat No 98CH36173) RELPHY-98 [online]. IEEE, 1998, s. 9-16 [cit. 2014-05-28]. DOI: 10.1109/RELPHY.1998.670436. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=670436>
- [14] MICROCON. [online]. [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.microcon.cz/>
- [15] SAX, H. SGS-THOMSON MICROELECTRONICS. Stepper motor driving. 1995. Dostupné z: http://users.ece.utexas.edu/~valvano/Datasheets/Stepper_ST.pdf
- [16] LEADSHINE TECHNOLOGY CO., Ltd. User's Manual For MB415 Micro Microstepping Driver. 2000. Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/PDF/M415.pdf>
- [17] ARTSOFT USA. Návod k používání Mach3 Mill. 2010. Dostupné z: http://www.cncshop.cz/PDF/Mach3Mill_1.84_CZ.pdf
- [18] ARDUINO. Arduino - DelayMicroseconds [online]. 2014 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://arduino.cc/en/Reference/DelayMicroseconds>
- [19] HODGSON., Gary. Garyhodgson.com/reprap: DLP Resin Printer [online]. 2012 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://garyhodgson.com/reprap/2012/06/dlp-resin-printer/>
- [20] ZLATNICTVÍ AA. 3D tisk [online]. 2013, 27. 3. 2013 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://3dtisk.blogspot.cz/>
- [21] JOYCE, Michael. KICKSTARTER. B9Creator: A High Resolution 3D Printer [online]. 2012 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <https://www.kickstarter.com/projects/b9creations/b9creator-a-high-resolution-3d-printer>
- [22] MUSKIN, Joe a Matt RAGUSA. THE NANO-CEMMS CENTER. 3d Printing [online]. 2014 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: https://nano-cemms.illinois.edu/materials/3d_printing_full
- [23] 3 D L P rint: DIY 3D DLP Printer using UV/Vis sensitive resins. [online]. 2013 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://3dlprint.blogspot.cz/>
- [24] 3D Tisk fotochemicky [online]. 2007 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.c-n-c.cz/viewtopic.php?f=81&t=8114&sid=8a7e3ee09f563348af443fc50ce4fc41>

9 Seznam použitých zkratk a symbolů

DLP ...Digital Light Processing

RP ...Rapid Prototyping

CAD ...computer aided design

DAM ...Digital Additive Manufacturing

MEMS ...microelectromechanical systems

MOEMS ...micro-opto-electro-mechanical systems

FDM ...Fused Deposition Modeling

DIY ...do it yourself

UV ...ultraviolet

DMD ...Digital Micromirror Device

USB ...Universal Serial Bus

LPT ...Line Printer Terminal

HW ...hardware

NI ...National Instruments

VISA ...Virtual Instrument Software Architecture

$M_{Doporučená}$...doporučené axiální zatížení šroubu

M_{Vmax} ...maximální možná hmotnost výrobku

$x_{max}, y_{max}, z_{max}$...maximální možné rozměry výrobku v jednotlivých souřadnicích

ρ ...hustota fotopolymeru

M_p ...hmotnost plošiny

ΔM ...rozdíl mezi doporučeným axiálním zatížením šroubu a hmotností plošiny

F_T ...třecí síla v lineárním vedení (vzniklá působením přítláčné síly vyvolané jednou kuličkovou dráhou)

C_{dyn} ...dynamická únosnost

F_{rad} ...radiální přítláčná síla vyvozená jednou kuličkovou dráhou

μ ...koeficient tření v rci (3), účinnost v rci (5)

F_{Ax} ...axiální síla působící na šroub

g ...gravitační zrychlení

M ...moment potřebný pro pohánění posuvného šroubu

P ...stoupání závitu posuvného šroubu Kerk

I_C, I_n ...jmenovitý proud motoru

I_L ...proud protékající vinutím

I_P ...špičkový výstupní proud driveru

R_{celk} ...celkový odpor obvodu na obr. 4.8 při DIR i PUL v hodnotě low a odpojení ENA

I ...proud dodávaný pinem VCC při DIR i PUL v hodnotě low a odpojení ENA

$zpozdeni$...délka pulsu DIR

n ...otáčky motoru

LT ...tloušťka vrstvy v μm

ET ...čas expozice v s

I_e ...intenzita záření

Φ_e ...zářivý tok

S ...ozářovaná plocha

10 Seznam příloh

Příloha 1: Firmware1_3 – firmware tiskárny

Příloha 2: PrinterHost2.2 – host software tiskárny

Příloha 3: CD s elektronickou verzí diplomové práce